



Universidad
Carlos III de Madrid

PROYECTO FIN DE CARRERA

SIMULACIÓN CFD DE TIPO EULERIANA-EULERIANA DE DOS FLUIDOS DE UN LECHO FLUIDO BIDIMENSIONAL CON INCORPORACIÓN DE LOS EFECTOS DEL PLÉNUM

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

Autor: ADOLFO SANZ JIMÉNEZ

Tutor: ANTONIO ACOSTA IBORRA

Leganés, julio de 2010





Título: SIMULACIÓN CFD DE TIPO EULERIANA-EULERIANA DE DOS
FLUIDOS DE UN LECHO FLUIDO BIDIMENSIONAL CON INCORPORACIÓN DE
LOS EFECTOS DEL PLÉNUM

Autor: Adolfo Sanz Jiménez

Director: Antonio Acosta Iborra

EL TRIBUNAL

Presidente: Eloy Fernández Domínguez

Vocal: Daniel Fernández Galisteo

Secretario: Juan Francisco Girón de Ana

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 22 de julio de 2010 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE





Agradecimientos

Agradezco a mis padres y a mi novia el apoyo y comprensión que han mostrado durante los momentos más difíciles de mi carrera, a mi tutor, Antonio, por estar disponible siempre que necesitaba su ayuda y a Sergio Sánchez por facilitarme la documentación que necesitaba para realizar una parte fundamental del proyecto.



RESUMEN

En este proyecto se aborda la simulación numérica de un lecho fluido bidimensional aire-sólido en régimen burbujeante (con velocidad superficial en rango de 1,5 a 2,5 veces la velocidad de mínima fluidización). Para ello se recurre a un modelo de dos fluidos de tipo Euleriano. Para la resolución de las ecuaciones el proyecto recurre al código comercial FLUENT 6.3. En una primera etapa se compara la simulación obtenida de un lecho sin incorporación del plenum de distribución de aire con resultados de simulación disponibles en literatura abierta. En una segunda etapa, y como contribución novedosa del proyecto, se incorporan en el proyecto los efectos del plenum de distribución de aire, lo cual permite una reproducción más realista de las condiciones del flujo de aire en la entrada del aire en el lecho. Los resultados de la simulación son comparados con medidas experimentales existentes. Además, se realiza un barrido de diversas condiciones operativas del lecho y de modelos de resistencia entre aire y sólidos.



ABSTRACT

This project addresses the numerical simulation of a two-dimensional fluid bed air-solid at bubbling regime (surface speed range from 1.5 to 2.5 times the minimum fluidization velocity). This is done through an Eulerian two-fluid model. For the solution of the equations of the model, a commercial code FLUENT 6.3 is used. As a first step, the simulation obtained from a bed without addition of air distribution plenum is compared with simulation results available in open literature. In a second stage, and as new contribution, the project incorporates the effects of air distribution plenum, enabling a more realistic reproduction of the conditions of air flow at the entrance of air into the bed. The simulation results are compared with existing experimental measurements. In addition, this study also undertakes a parametric study of the effects of various operational conditions of the bed and resistance models for the interaction between air and solids.

ÍNDICE GENERAL

	Página
1. Notación	16
1 Introducción	17
1.1 Contexto y motivación del proyecto	17
1.2 Objetivos del proyecto	20
1.3 Metodología seguida para la consecución de los objetivos del proyecto	21
1.4 Lechos fluidos y aplicaciones industriales	23
1.4.1 Antecedentes	23
1.4.2 Marco Histórico	23
1.4.3 Combustión en Lecho Fluidizado (FBC)	24
1.4.4 Secado por lechos fluidizados. Efecto de presión y temperatura	24
1.4.5 Uso de vapor sobrecalentado en lechos fluidizados	25
1.4.6 Problemas encontrados y nuevas líneas de investigación en la fluidización	26
1.4.7 Ventajas e inconvenientes	27
1.5 Principales metodologías para la simulación de lechos fluidos	29
2 Lechos fluidos solido-aire	32
2.1 Definición de lecho fluido	32
2.2 Características principales de los lechos fluidos	33
2.3 Caracterización de los lechos fluidos mediante señales de presión	35
2.3.1 Contexto histórico	35
2.3.2 Análisis de espectros	36
3 Simulación de lechos fluidos mediante técnicas de CFD	38
3.1 Concepto de dos fluidos interpenetrantes	38
3.2 Ecuaciones eulerianas de conservación para flujos granulares	39
3.3 Modelos semiempíricos de cierre de las ecuaciones	40
3.4 Ecuación de la temperatura granular	42
3.5 Simulación de lechos fluidos mediante el código FLUENT	45
4 Modelo computacional	46
4.1 Bloque 1: Reproducción y comparación de un estudio computacional sobre un lecho fluidizado	46
4.1.1 Modelo físico y dominio computacional	46
4.1.2 Condiciones operativas	48
4.1.3 Mallado del dominio computacional	48
4.1.4 Descripción de los casos	49
4.2 Bloque 2: Incorporación de plénum y distribuidor	50
4.2.1 Modelo físico y dominio computacional	50
4.2.2 Condiciones operativas	54
4.2.2.1 El distribuidor de aire	54
4.2.2.2 El plénum	56
4.2.3 Mallado del dominio computacional	57
4.2.4 Descripción de los casos	58

4.3 Reproducción y comparación del caso llevado a cabo en la UC3M	60
4.3.1 Modelo físico y dominio computacional	60
4.3.2 Condiciones operativas	61
4.3.3 Mallado del dominio computacional	61
4.3.4 Descripción del caso	62
4.4 Estrategia de inicialización y arranque	63
4.5 Resumen de casos	65
5 Resultados	66
5.1 Reproducción y comparación de un estudio computacional sobre un lecho Fluidizado	66
5.1.1 Fracción de volumen de sólidos	66
5.1.2 Grado de expansión del lecho fluido	69
5.1.3 Caída de presión en la columna del lecho	72
5.1.4 Aparición de burbujas de aire	73
5.1.5 Velocidad de las partículas sólidas	75
5.1.6 Tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control	77
5.2 Efecto de la inclusión del plénum	79
5.2.1 Modelos de plénum	79
5.2.1.1 Velocidad aire sobre la superficie del distribuidor	80
5.2.1.2 Tránsito de burbujas de aire	81
5.2.1.3 Fracción de volumen de aire	82
5.2.1.4 Velocidad de partículas solidas	83
5.2.1.5 Perfil de vectores de aire en el modelo de entrada A	84
5.2.2 Caracterización del distribuidor de aire	86
5.2.2.1 Caída de presión del lecho	86
5.2.2.2 Fracción de volumen de sólidos	87
5.2.2.3 Velocidad del aire sobre el distribuidor	88
5.2.3 Velocidad de fluidización	89
5.2.3.1 Fracción de volumen de la fase sólida	89
5.2.3.2 Velocidad de las partículas sólidas	90
5.2.3.3 Señales de presión	92
5.3 Comparación con datos experimentales	95
5.3.1 Fracción de volumen de sólidos	95
5.3.2 Velocidad de las partículas sólidas	97
5.3.3 Señales de presión	99
5.3.4 Frecuencia de paso de burbujas	103
5.3.5 Velocidad del aire sobre el distribuidor	103
5.3.6 Fracción de volumen de aire	104
5.3.7 Velocidad de ascensión de las burbujas	105
6 Conclusiones	109
6.1 Resumen de las tareas realizadas	109
6.2 Principales resultados	111
6.2.1 Reproducción y comparación de un estudio computacional sobre un lecho fluidizado	111



6.2.2	Efecto de la inclusión del plénum	114
6.2.2.1	Modelos de plénum	114
6.2.2.2	Caracterización del distribuidor de aire	116
6.2.3	Velocidad de fluidización	118
6.3	Comparación con datos experimentales	121
6.4	Estimación del coste del proyecto	125
6.5	Crítica a los resultados	126
6.6	Líneas futuras de estudio	127
7	Bibliografía	128
8	Referencias	130

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1: Adquisición síncrona de sensores de tipo fotodiodo y de medida de presión	37
Figura 4.1: Esquema de la instalación para la reproducción y comparación de un estudio computacional sobre un lecho fluidizado	47
Figura 4.3: Modelo de plénum empleado en el Departamento de Conversión de Energía de la Universidad Tecnológica de Chalmers	51
Figura 4.4: Modelo de plénum empleado en el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la UC3M	52
Figura 4.5: Esquema de la instalación con incorporación del plénum y del Distribuidor	53
Figura 4.6: Caída de presión en el distribuidor	55
Figura 4.7: Modelo de plénum A	57
Figura 4.8: Modelo de plénum B	57
Figura 4.9: Detalle del refinamiento de la malla A en las entradas al plénum	58
Figura 4.10: Efecto pistón al emplear el modelo de plénum B sin combinar	64
Figura 5.1: Resultados obtenidos en U.B.C. (Modelo: Syamlal-O'Brien; $U=0,38\text{m/s}$; $e_{ss}=0,9$)	67
Figura 5.2: Caso 1; Formulación: Syamlal-O'Brien; $U=0,38\text{m/s}$; $e_{ss}=0,9$; paso de tiempo= $0,001\text{s}$	68
Figura 5.3: Caso 3; Formulación: Gidaspow; $U=0,38\text{m/s}$; $e_{ss}=0,9$; paso de tiempo= $0,001\text{s}$	68
Figura 5.4: Caso 2; Formulación: Syamlal-O'Brien; $U=0,38\text{m/s}$; $e_{ss}=0,9$; paso de tiempo= $0,0005\text{s}$	69
Figura 5.5: Comparación realizada por B.C.U. del grado de expansión del lecho fluido según la velocidad de inyección de gas para distintos modelos de cálculo con respecto al experimento ($e_{ss} = 0,9$)	70

Figura 5.6: Fracción de fase sólida (Caso 1; Formulación: Syamlal-O'Brien; $U=0,38$)	71
Figura 5.7: Grado de expansión del lecho utilizando el criterio del 90%	71
Figura 5.8: Grado de expansión del lecho utilizando el criterio del 50%	72
Figura 5.9: Comparación realizada por B.C.U. de la caída de presión en el lecho simulado usando los modelos de Syamlal-O'Brien y Gidaspow para el caso central del estudio (velocidad de fluidización = $0,38 \text{ m/s}$; $e_{ss} = 0,9$)	73
Figura 5.10: Comparación de la caída de presión en el lecho simulado usando los modelos de Syamlal-O'Brien (Caso 1) y Gidaspow (Caso 3). Velocidad de fluidización = $0,38 \text{ m/s}$; $e_{ss} = 0,9$	73
Figura 5.11: Fracción volumétrica de aire en la simulación realizada por la U.B.C. ($z=0,2\text{m}$; $U=0,46\text{m/s}$)	74
Figura 5.12: Fracción volumétrica de aire (Caso 1; Formulación: Syamlal-O'Brien; $z=0,2\text{m}$; $U=0,38\text{m/s}$; $e_{ss}=0,9$; paso de tiempo= $0,001\text{s}$)	74
Figura 5.13: Velocidad media de los sólidos frente a la teórica (resultados por la U.B.C.); $U=0,46\text{m/s}$	76
Figura 5.14: Velocidad media de los sólidos frente a la teórica (resultados por el presente estudio para el Caso 1); $U=0,38\text{m/s}$	76
Figura 5.15: Tránsito de burbujas de aire obtenido por la U.B.C. en el caso experimental ($z=0,2\text{m}$)	77
Figura 5.16: Tránsito de burbujas de aire obtenido por la U.B.C. en el caso simulado	77
Figura 5.17: Tránsito de burbuja de aire (Caso 1; $z=0,2\text{m}$)	78
Figura 5.18: Velocidad vertical del aire sobre el distribuidor ($z=0$); Modelos A y B frente a curva teórica	80
Figura 5.19: Fracción volumétrica de aire sobre punto ($z=20\text{cm}$); Modelos A y B	81
Figura 5.20: Fracción volumétrica de aire ($z=20\text{cm}$); Modelos A y B	82
Figura 5.21: Velocidad vertical de las partículas sólidas ($z=20\text{cm}$); Modelos A y B	83
Figura 5.22: Velocidad horizontal de las partículas sólidas ($z=20\text{cm}$); Modelos A y B	84
Figura 5.23: Vectores de velocidad del aire ($2 \cdot U/U_{mf}$); Modelo A	85



Figura 5.24: Caída de presión en el distribuidor; CASOS 6 y 8	86
Figura 5.25: Fracción volumétrica de sólidos para los modelos de simulación 6 y 8	87
Figura 5.26: Velocidad vertical del aire sobre el distribuidor según la pérdida de carga; CASOS 6 y 8	88
Figura 5.27: Fracción volumétrica de sólidos ($t=9s$); Casos 7,8 y 9	90
Figura 5.28: Velocidad vertical de las partículas sólidas para los casos de 1,5 y 2,5 veces la velocidad de mínima fluidización ($z=20cm$)	91
Figura 5.29: Velocidad horizontal de las partículas sólidas para los casos de 1,5 y 2,5 veces la velocidad de mínima fluidización ($z=20cm$)	92
Figura 5.30: Espectro de potencia característico de un lecho fluido burbujeante	93
Figura 5.31: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Casos 7, 8 y 9	94
Figura 5.32: Captura instantánea de fracción de volumen de partículas sólidas ($t=12s$); CASO 10 (a) y CASO 8 (b)	96
Figura 5.33: Fracción volumétrica de partículas sólidas en el caso experimental	96
Figura 5.34: Fracción volumétrica de partículas sólidas en el caso simulado	96
Figura 5.35: Velocidad vertical de las partículas sólidas en el caso experimental	98
Figura 5.36: Velocidad vertical de las partículas en el caso simulado; CASO 10	98
Figura 5.37: Velocidad horizontal de las partículas sólidas en el caso simulado ($z=22,5cm$); CASO 10	99
Figura 5.38: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Datos experimentales	100
Figura 5.39: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Caso 10	100
Figura 5.40: Espectro de potencia de la señal de presión; Caso 10	101
Figura 5.41: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Caso 10	102
Figura 5.42: Espectro de fracción de volumen de fase sólida; Caso 10	103
Figura 5.43: Velocidad vertical del aire sobre el distribuidor ($z=0$); CASO 10	104
Figura 5.44: Fracción volumétrica de aire sobre línea de control ($z=22,5cm$)	105
Figura 5.45: Fracción volumétrica de aire sobre punto situado a 10cm	106



Figura 5.46: Fracción volumétrica de aire sobre punto situado a 20cm	106
Figura 5.47: Fracción volumétrica de aire sobre punto situado a 30cm	107
Figura 5.48: Superposición de la señal de fracción de volumen de aire	107
Figura 6.1: Fracción de sólidos ($t=3s$); CASOS 1, 2 y 3	112
Figura 6.2: Altura del lecho para distintas velocidades de fluidización; CASOS 1 a 4	112
Figura 6.3: Velocidad de las partículas sólidas sobre el fondo del lecho	113
Figura 6.4: Velocidad vertical del aire sobre el distribuidor ($z=0$); Modelos A y B Frente a curva teórica	114
Figura 6.5: Fracción volumétrica de aire ($z=20cm$); Modelos A y B	115
Figura 6.6: Velocidad vertical de las partículas sólidas ($z=20cm$); Modelos A y B	115
Figura 6.7: Vectores de velocidad del aire ($2 \cdot U/U_{mf}$); Modelo A	116
Figura 6.8: Caída de presión en el distribuidor; CASOS 6 y 8	117
Figura 6.9: fracción volumétrica de sólidos para los casos de simulación 6 y 8	117
Figura 6.10: Velocidad vertical del aire sobre el distribuidor según la pérdida de carga; CASOS 6 y 8	118
Figura 6.11: Fracción volumétrica de sólidos ($t=9s$); Casos 7,8 y 9	119
Figura 5.28: Velocidad vertical de las partículas sólidas para los casos de 1,5; 2 y 2,5 veces la velocidad de mínima fluidización ($z=20cm$)	120
Figura 6.12: Fracción volumétrica de partículas sólidas para el caso experimental (a) y el caso simulado (b)	121
Figura 6.13: Velocidad vertical de las partículas sólidas en el caso experimental	122
Figura 6.14: Velocidad vertical de las partículas en el caso simulado ($z=20cm$); CASO 10	44
Figura 6.15: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Datos experimentales	122
Figura 6.16: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Caso 10	123
Figura 6.17: Espectro de potencia de la señal de presión; Caso 10	123
Figura 6.18: Espectro de fracción de volumen de fase sólida; Caso 10	124



ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 4.1: Resumen del dominio computacional del bloque 1	47
Tabla 4.2: Resumen de los casos bloque 1: Casos 1 a 4	49
Tabla 4.3: Resumen del dominio computacional del bloque 2	54
Tabla 4.4: Resumen de casos bloque 2: Casos 5 a 9	59
Tabla 4.5: Resumen del dominio computacional del bloque 3	61
Tabla 4.6: Características principales del Caso 10	62
Tabla 4.7: Resumen de casos y características principales	65
Tabla 5.1: Resumen de casos bloque 1. Tiempo de computación	66
Tabla 5.2: Resumen de casos bloque 2. Tiempo de computación	79
Tabla 5.3: Resumen de casos con distinta velocidad de fluidización	89
Tabla 5.4: Características generales del CASO 10	95
Tabla 6.1: Resumen de tareas realizadas	110

Notación

C_D	coef. de fricción, []	v_i	velocidad, m/s
d_i	diámetro, m	z	coordenada altura desde el distribuidor, m
e_{ss}	coef. restitución, []	α_i	fracción volumétrica, []
g	aceleración de la gravedad, m/s^2	$\gamma_{\theta s}$	energía de disipación por colisión, kg/s^3m
$g_{0,ss}$	coef. distribución radial, []	ϵ_i	burbuja, []
H	altura del lecho expandido, m	η_i	viscosidad dinámica, $kg/s\ m$
H_0	altura del lecho inicial, m	Θ_i	temperatura granular, m^2/s^2
\bar{I}	tensor de inercia, []	λ_i	viscosidad volumétrica, $kg/s\ m$
I_{2D}	Segundo invariante del tensor de inercia, []	μ_i	viscosidad tangencial, $kg/s\ m$
$k_{\theta s}$	coef. Difusión de energía granular, $kg/s\ m$	ν_i	viscosidad cinemática, $kg/s\ m$
K_{gs}	coef. difusión de fuerzas, []	$\Delta\rho$	diferencia de densidad entre gas y fase sólida, kg/m^3
P	presión, Pa	ρ_i	densidad, kg/m^3
r	coordenada radial, m	$\bar{\tau}_i$	tensor de tensiones, Pa
Re	número de Reynolds, []		
t	tiempo, s		
U	velocidad de fluidización, m/s		

Subíndices

g	gas
s	sólidos
mf	mínima fluidización

Referencias en el texto

(_)	Número de ecuación
[_]	Referencia bibliográfica



1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Los lechos fluidizados de tipo gas-sólido se emplean en muchas operaciones industriales de plantas químicas, farmacéuticas y de la producción energética. A pesar de su aplicación generalizada, gran parte del desarrollo y diseño de reactores de lecho fluidizado ha sido empírico ya que el complejo comportamiento del flujo formado por gas-sólido que se encuentra en estos sistemas hace que el modelado sea una tarea difícil. El problema fundamental es la modelación hidrodinámica del lecho fluidizado ya que la interfase entre el gas y la fase densa es transitoria y desconocida y los fenómenos de interacción entre fases son conocidos sólo para una rango muy limitado de condiciones (Gilbertson and Yates, 1996). El primer paso para resolver la mezcla de dos fases es tratar a cada fase mediante la mecánica de medios continuos estándar con los límites y condiciones de salto para resolver las ecuaciones que rigen la interfase (Ishii, 1975). Sin embargo, la complejidad matemática de las ecuaciones no lineales y, en particular las condiciones de movimiento, hacen que la resolución numérica sea muy compleja. Con el advenimiento de un aumento de las capacidades de cómputo, la dinámica de fluidos computacional, CFD (Computational Fluid Dynamics), ha cobrado gran importancia como herramienta para las modelaciones hidrodinámicas. Si bien es ahora una herramienta estándar para los flujos de fase única, es en el desarrollo de fases de sistemas multifásicos, tales como lechos fluidizados, donde reside el interés.

El modelado mediante CFD es una ardua tarea. Existen dos enfoques diferentes desde los que se partió para los primeros intentos de aplicar modelos CFD a gas-sólido en lechos fluidizados: un método discreto basado en la dinámica de partículas (modelo de Lagrange), y un método continuo basado en la mecánica de medios continuos, que trata las dos fases como interpenetrantes (modelo Euleriano-Euleriano). Estos dos enfoques han sido comparados por Gera et al. (1998).

Si bien el modelo Lagrangiano para fluidos de dos fases es capaz de considerar los efectos de las colisiones entre partículas y los esfuerzos que transmite el gas sobre ellas, el requerimiento computacional es tan elevado que se desecha el método para simulaciones con un número de partículas elevado, dejando el modelo Euleriano-Euleriano como el preferido hoy en día para simulaciones hidrodinámicas a nivel macroscópico.



El método de los elementos distintos, DEM (Distinct Element Method), es uno de los modelos de trayectorias empleados con el enfoque de Lagrange, tal y como se comentará más adelante. A pesar de las limitaciones existentes en los modelos DEM, las investigaciones en este campo van dirigidas hacia el empleo de este método para las simulaciones de lechos fluidizados.

Aunque existen numerosos desafíos, la aplicación de CFD para la modelación hidrodinámica de los lechos fluidizados se sigue desarrollando ya que tiene muchas ventajas sobre las posibles aplicaciones en la industria, incluyendo tanto el diseño como el dimensionado y la optimización de dichos sistemas. Sin embargo, algunas de las correlaciones utilizadas en los modelos quedan resueltas mediante modelos por empíricos o semi-empíricos. Como consecuencia de este hecho, el modelo y sus parámetros deben ser validados con los resultados obtenidos experimentalmente en configuraciones de escala similar. Algunas de las validaciones de modelos CFD para los sistemas de gas-sólido han sido recogidas por Taghipour and Grace (2004).

De entre toda la documentación existente respecto a los lechos fluidizados, en muy pocos casos se ha considerado en la simulación la presencia de un plénum y un distribuidor para inyectar el flujo de la fase gaseosa. El distribuidor es en esencia una placa perforada. Por sus orificios fluye el aire de fluidización y en función del número y tamaño de dichos agujeros así como de su rugosidad se hablará de una porosidad y pérdida de carga específicas. El plénum es una caja situada bajo el distribuidor. La función de estos elementos es la de garantizar un reparto ecuánime de la cantidad de aire que se introduce por la superficie inferior de la columna de lecho.

Se ha comprobado que el distribuidor de aire tiene una influencia importante sobre el comportamiento del lecho: cuando la caída de presión en el distribuidor es menor que la caída que tiene lugar en el lecho, el sistema de inyección de aire (distribuidor, plénum, válvulas, etc) puede afectar significativamente sobre el carácter del lecho fluido mientras que, cuando la caída de presión que se produce en el distribuidor es mayor de la que ocurre en el lecho la influencia de estos elementos es poco significativa. Desafortunadamente, en la mayoría de las aplicaciones industriales se opta por instalar sistemas de inyección de aire cuya caída es menor que la del lecho, debido principalmente a factores económicos. Es por este motivo que es de gran importancia conocer la influencia de los sistemas de inyección para poder optimizar los procesos.

En este documento se mostrará la importancia de añadir dicho elementos al modelo de CFD para obtener las fluctuaciones de presión adecuadas y la correcta dinámica de burbujas sobre el lecho, y de cómo varían los resultados obtenidos según

se establezcan las condiciones de contorno sobre ellos. Así pues, se actuará sobre parámetros tales como la caída de presión que existe por la presencia del distribuidor y el método de entrada del gas al plénum desde diferentes superficies.

Con respecto a los estudios hidrodinámicos de lechos fluidizados, comúnmente se emplean modelos de dos dimensiones (2D) en dominios rectangulares (columnas) con el fin de estudiar las propiedades de las burbujas y así ofrecer una visualización cualitativa de las características de la fluidización. Sin embargo, aunque la visualización de la fluidización resulte útil, el movimiento de las burbujas y las partículas está muy influenciado por el efecto de pared de las columnas empleadas en los modelos de 2D. En este estudio, tanto los resultados experimentales utilizados como la simulación llevada a cabo se realizan bajo una morfología 2D para así permitir una comparación válida de los resultados hidrodinámicos obtenidos.

La simulación CFD se ha llevado a cabo mediante un software comercial de CFD, FLUENT, disponible en las aulas informáticas de la Escuela Politécnica de la Universidad Carlos III de Madrid que están a disposición de los alumnos. Este software permite emplear varios modelos de los anteriormente mencionados y será la herramienta fundamental en el desarrollo del proyecto. Por otra parte, El Departamento de ingeniería Térmica y de Fluidos dispone de un laboratorio propio en el que realizar los ensayos experimentales sobre los lechos fluidos. Los datos experimentales utilizados en la sección 5.3 del presente proyecto han sido cedidos cortésmente por el Departamento para poder validar los resultados de la simulación.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos del proyecto son los siguientes:

- Familiarizar al alumno con los programas de simulación CFD utilizando la versión comercial FLUENT disponible en las aulas informáticas de la Escuela Politécnica de la Universidad Carlos III de Madrid.
- Establecer un punto de partida para el estudio de los lechos fluidos mediante la reproducción y comparación de casos estudiados por otros autores.
- Introducir variaciones sobre el diseño con objeto de estudiar su influencia y de este modo poder mejorar las simulaciones CFD.
- Incorporar los efectos del plénum y del distribuidor de aire en un lecho fluido bidimensional. Dichos efectos no pretenden abarcar toda la física compleja de un distribuidor real tridimensional (3D). En su lugar se intenta retener aquellos comportamientos más esenciales del distribuidor, como por ejemplo la no imposición de un perfil homogéneo de velocidades a la entrada, de una manera práctica y sencilla.
- Validar los resultados obtenidos en las simulaciones mediante la comparación con los datos experimentales procedentes de otros autores.
- Contribuir al campo de investigación de lechos al introducir los efectos del plénum y del distribuidor de aire mediante procedimientos sencillos. la línea principal de estudio del distribuidor iniciada en este proyecto parte desde cero por lo que existe un amplio abanico de posibilidades para poder continuar en futuras investigaciones.

1.3 METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LA CONSECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS DEL PROYECTO

Para poder abordar el estudio del comportamiento de los lechos fluidizados se realizó una búsqueda bibliográfica, principalmente en la biblioteca de la Universidad Carlos III de Madrid, ya que posee una numerosa colección de libros de ingeniería. Los primeros conocimientos sobre el campo de los lechos fluidos vinieron de la mano de “Fluidization Engineering” segunda edición, de Daizo Kunii y Octave Levenspiel.

La realización de este documento está basada en el manejo de un software de CFD comercial llamado FLUENT. Dado el nivel de complejidad que alcanzan este tipo de software en primer lugar se reprodujo el caso 2.3 disponible en la ayuda tutorial que proporciona la compañía. Los resultados carecen de ningún interés por lo que no se han incorporado a este documento. Una vez familiarizados con el software se procedió a la creación de los primeros modelos de malla mediante otro software llamado GAMBIT, compatible con FLUENT. Este programa permitirá diseñar la geometría de los modelos necesaria para los apartados posteriores.

Para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos marcados se estructuró el proyecto de la siguiente manera:

1. Búsqueda bibliográfica y documentación sobre los lechos fluidizados.
2. Reproducción del caso 2.3, ejemplo disponible en la ayuda tutorial de FLUENT
3. Reproducción y comparación del caso publicado por el Departamento de Ingeniería Química y Biológica de la Universidad de British Columbia el 22 de enero de 2005. En dicha publicación se realizó una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente al diseñar una columna 2D de lecho fluidizado y lo obtenido mediante simulación CFD para el mismo modelo geométrico. En este documento se reproducirá la simulación CFD para comparar los resultados.
4. Incorporación de plénum y distribuidor de aire a la simulación por CFD del caso anterior. Comparación con los resultados obtenidos sin dichos elementos según la configuración adoptada. El objetivo de este apartado será determinar el comportamiento del lecho fluidizado al incorporar un plénum, variando así el modo de introducir la fase gaseosa al lecho.



5. Reproducción y comparación del proyecto experimental llevado a cabo por Sergio Sánchez Delgado en el Laboratorio de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid. En este apartado se simuló mediante Fluent el modelo experimental con el fin de validar los resultados obtenidos mediante el software. Es de agradecer al autor de dicho experimento que facilitara el acceso a los resultados que obtuvo y así permitir ampliar el estudio realizado en este documento.



1.4 LECHOS FLUIDOS Y APLICACIONES INDUSTRIALES

1.4.1 Antecedentes

El uso de equipos de lechos fluidizados ha abierto un amplio abanico de posibilidades para la mejora de varias tecnologías industriales. La aplicación de lechos fluidizados representa una vía de ataque al problema de incrementar la transferencia de calor entre superficies y corrientes de proceso. En muchos casos las propiedades de los lechos fluidizados posibilita la no utilización de procesos horneados en operaciones continuas en las que no son deseables. Por otro lado, los procesos fluidizados también facilitan la automatización de los procesos. Sin embargo, el desarrollo de equipos de lechos fluidizados se ha visto obstaculizado por la escasez de estudios especializados y por el retraso en la sistematización y generalización de material disponible.

1.4.2 Marco Histórico

La técnica de fluidización se empezó a utilizar comercialmente en el campo de la minería y la ingeniería metalúrgica en procesos como la sedimentación y la clasificación de densidad. Probablemente, la primera aplicación exitosa de lechos de gas fluidizados se sitúa en la ingeniería del proceso de desintegración catalítico.

Durante la segunda guerra mundial (1939-1945), existió una gran demanda por combustible de alto octanaje para los motores alternativos usados en las aeronaves. El proceso de desintegración del petróleo provoca que cierta cantidad de carbón se deposite en el catalizador, el cual queda rápidamente ensuciado y tiene que ser regenerado. Llegados a este punto, resultaba imposible desarrollar lechos reactores de forma convencional ya que no podían satisfacer los altos requerimientos. Las técnicas de fluidización proporcionaron los medios para que las reacciones de desintegración y regeneración pudieran realizarse, dando fin al problema de transferir el ensuciado catalizador del reactor al generador y de vuelta, con un nivel adecuado de rendimiento.

Consecuentemente, la industria química y del petróleo se ha concentrado en el estudio de las aplicaciones de lechos fluidizados para poder explotar la ventaja de la técnica de manejar sólidos en operaciones de contacto entre líquidos y sólidos. A pesar de que en el proceso de agrietamiento las propiedades de transferencia de calor del sistema fluidizado han sido esenciales para conseguir operaciones exitosas, este aspecto era usualmente tomado por sentado y no tan explícitamente explotado.



Resulta esencial dar a conocer las propiedades de los lechos fluidizados para facilitar un mejor entendimiento de los complejos procesos que ocurren en este tipo de equipos y, de esta manera, proporcionar a los trabajadores las bases necesarias para la aplicación creativa de los lechos fluidos en las diversas áreas industriales. En los últimos años se ha generalizado el estudio de las propiedades de la fluidización motivado sin duda por los logros obtenidos experimentalmente, que han ocasionado una revolución técnica en varios campos.

1.4.3 Combustión en Lecho Fluidizado (FBC)

La combustión en lecho fluidizado es un método para quemar carbón en un lecho de partículas calientes suspendidas en una corriente de gas. A una tasa de flujo suficiente, el lecho actúa como un fluido y permite una mezcla rápida de las partículas. El carbón es añadido al lecho y la mezcla uniforme posibilita la combustión completa y una menor temperatura que en los sistemas de combustión con carbón pulverizado. Además, tienen las ventajas de producir menos NO_x en el gas de salida, y debido a las menores temperaturas de combustión producen menos SO_x (adicionalmente se añade caliza al carbón). Esta tecnología puede también usar un rango más amplio de combustibles que las tecnologías de combustibles pulverizados. Los lechos fluidizados de presión atmosférica están comercialmente disponibles en dos tipos: lecho burbujeante (conocido como combustión en lecho fluidizado atmosférico - AFBCs) y el lecho circulante (CFBCs). La eficiencia de la mayoría de los lechos fluidizados usados para la generación de electricidad es similar a la de las plantas convencionales de carbón pulverizado. Sin embargo, esta tecnología ha sido estimulada debido a su mejor desempeño ambiental. Los lechos fluidizados presurizados, los cuales pueden alcanzar eficiencias del 45%, están en etapas avanzadas de demostración. Como en las plantas de combustibles pulverizados, la utilización de mayores presiones de vapor podría aumentar aún más la eficiencia.

1.4.4 Secado por lechos fluidizados. Efecto de presión y temperatura

La fluidización de lechos se emplea para el secado de partículas ya que las características de este tipo de sistemas hacen que el grado de interacción entre fases sea muy alto. Se han realizado diferentes experimentos variando la presión y temperatura en lechos fluidizados y se ha observado que la variación de dichos parámetros tiene un efecto considerable en estos procesos. Trabajo experimental señala que en caso de partículas porosas, la reducción de la presión operacional



aumenta la difusión en el sistema sólido-gas, y juega un papel favorable en el proceso de secado, aunque al mismo tiempo la capacidad de transporte del medio exterior se reduce. Sin embargo el incremento en la velocidad de secado conseguida con las partículas porosas no se observa en el proceso de secado de partículas compactas ya que la difusividad efectiva a través de estas partículas no es sensible a la variación en la presión operacional.

La mayoría de los procesos de lecho fluidizado operan dentro de unos rangos de temperatura y presión que se sitúan en torno a 1000°C y 70 bar, respectivamente. Sobre este rango de temperatura, la viscosidad del gas se incrementa con un factor de 3 a 4, dependiendo del gas empleado. Si la presión del sistema permanece constante mientras la temperatura varía, la densidad del gas disminuye sobre este rango de temperatura con un factor de 4.3. Si la presión del sistema es incrementada sin cambiar la temperatura, la densidad del gas se incrementa aproximadamente con el mismo factor.

Durante el proceso de secado de partículas porosas en un lecho fluidizado a vacío, las resistencias internas dominan el proceso durante el periodo de reducción de velocidad de secado, donde la capacidad de remoción de humedad fuera del fluido gana importancia.

Numerosos experimentos han mostrado que la velocidad mínima de fluidización se ve influenciada por la presión y temperatura operacional, incrementándose cuando se reduce la presión o cuando se incrementa la temperatura de operación.

1.4.5 Uso de vapor sobrecalentado en lechos fluidizados

En varios procesos de lechos fluidizados se ha reemplazado el medio de secado antes utilizado, sustituyendo el aire caliente por vapor sobrecalentado. Existen varias razones para ellos expuestas a continuación:

1. Ahorro de energía: más de un 90% de ahorro de energía es posible porque la energía suministrada a estos secadores puede ser recuperada en una forma utilizable.
2. Los secadores que operan con vapor sobrecalentado requieren un sistema cerrado, y por lo tanto no hay emisión de partículas finas a la atmósfera que cree contaminación.



3. Calidad del producto: Cuando se lleva a cabo el secado con vapor no hay posibilidad de que se contamine el producto por humo de gas u oxidación. En muchos casos este da una mejor calidad en el secado. Muchos alimentos para animales contienen fibras, proteínas y almidones. En estos productos se ha encontrado que al ser secados con vapor sobrecalentado son más fáciles de digerir y en muchos casos mantienen un valor nutritivo más alto.
4. No existe resistencia del gas alrededor de la superficie del sólido, incrementando la transferencia de masa.
5. No existe posibilidad de oxidación en una fluidización con vapor sobrecalentado debido a que el ambiente no contiene oxígeno. Otra ventaja de la falta de oxígeno es que se elimina el riesgo de incendio y de explosión.
6. Si se generan sustancias volátiles durante el proceso, pueden ser separadas posteriormente en un condensador.
7. Recuperada y usada en otras secciones, se puede eliminar la contaminación ambiental. Estudios recientes han determinado también otras ventajas del vapor sobrecalentado en los procesos de secado, como las altas velocidades de secado y la desodorización de los productos al realizarse en una cámara cerrada sin aire.

1.4.6 Problemas encontrados y nuevas líneas de investigación en la fluidización

En la actualidad cientos de procesos se realizan aplicando técnicas de fluidización. Estos procesos se estudian continuamente con el afán de mejorar su funcionamiento y su efectividad. Existen sin embargo ciertos procesos en los que todavía se pueden correr ciertos riesgos por lo que no son muy usados. En ciertos campos se ha abandonado pues, los procesos por lechos fluidizados, como en la industria química fina y en la industria farmacéutica. Estos problemas se refieren a la degradación térmica y seguridad, y son consecuencia de que, en el proceso de secado a altas temperaturas o largos tiempos de residencia, se puede suscitar la degradación parcial de los productos sensibles a la temperatura. Por otro lado en la industria farmacéutica los procesos están involucrados con la evaporación de solventes orgánicos, así como también, dentro de los límites de flamabilidad hay riesgos de que se forme una explosión.

Ante estos problemas surge la idea de lechos fluidizados a vacío, donde los lechos fluidizados operan a presiones y temperaturas más bajas. Las bajas temperaturas logradas bajo condiciones de vacío minimiza la probabilidad de degradación térmica. Al mismo tiempo, las bajas presiones de operación proporcionan un proceso seguro fuera de los límites de flamabilidad.

1.4.7 Ventajas e inconvenientes

Se puede resumir el comportamiento de los lechos fluidos para las aplicaciones industriales en forma de ventajas y desventajas de la siguiente manera:

Sus principales ventajas son:

- 1) La semejanza en comportamiento con los líquidos hace que su manejo pueda automatizarse y controlarse fácilmente.
- 2) La rapidez con la que se mezclan los sólidos hace que se alcance rápidamente un estado isoterma; por lo tanto, las operaciones pueden ser controladas de una forma sencilla y fiable.
- 3) Además, una buena mezcla de los sólidos proporciona una gran resistencia a cambios bruscos de temperatura, responde lentamente a cambios bruscos en las condiciones de funcionamiento y garantiza un amplio margen de seguridad en las reacciones muy exotérmicas.
- 4) La circulación de partículas entre dos lechos fluidos hace posible la adición o extracción de la cantidad necesaria en cada momento.
- 5) Es adecuado para operaciones a gran escala
- 6) Una enorme área de contacto entre el sólido y el fluido (un metro cúbico de partículas con un diámetro de 100 micras, tiene un área superficial mayor a los 30 mil metros cuadrados, que es similar al área superficial de la pirámide de Keops). Con esta gran área se logra alcanzar altas velocidades de transferencia de calor y masa entre el sólido y el fluido.

Los principales inconvenientes son:

- 1) En los lechos burbujeantes de partículas finas, la dificultad para describir el flujo del gas se convierte en algo crítico cuando se requieren productos intermedios en procesos de transformación de gases.
- 2) El rápido mezclado de los sólidos provoca un que los tiempos de residencia en el reactor no sean uniformes, lo que se traduce en heterogeneidad en los productos obtenidos
- 3) La erosión de los distintos componentes por parte de las partículas puede ser importante.
- 4) En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de partículas finas requerirá disminuir la temperatura del reactor, disminuyendo drásticamente el rendimiento.
- 5) El proceso demanda un gasto de potencia para la fluidización significativo.



- 6) Las velocidades operacionales están limitadas a un rango sobre el cual es lecho es fluidizado.
- 7) Existe un límite en el tamaño de las partículas que pueden ser fluidizadas (6500 micras o $\frac{1}{4}$ de pulgada hasta unas micras o 0.001 pulgadas). Este límite es particularmente dependiente de la viscosidad del fluido y la razón de densidad de la partícula y el fluido, así como de la velocidad del flujo del fluido.
- 8) La ausencia general de gradientes térmicos a través de un lecho fluidizado bien mezclado, es una desventaja en aquellas operaciones donde los gradientes térmicos son necesarios.
- 9) La dinámica de sistemas fluidizados no son suficientemente bien entendidos para permitirse realizar estos procesos a gran escala, cuando las condiciones de reacción son críticas

La característica de mayor peso que hace decantarse por este tipo de procedimiento es el bajo coste pero el éxito radica en analizar y minimizar los factores negativos. Algunas ventajas de la investigación sobre lechos fluidizados son:

- 1) Pequeñas mejoras en conversión y/o producción, tan pequeñas como un 0.5%, puede incrementar las ganancias en cientos de millones de dólares en todo el mundo.
- 1) La mejor operación de los equipos existentes pudiera ser lograda cuando la composición del catalizador o de la producción sea modificada. El encendido y funcionamiento de nuevas unidades más pequeñas, más largas o un poco diferentes en diseño podría traer mejoras en el proceso.
- 2) La experimentación e investigación de los diferentes procesos, nos brindará la ventaja de crear más aplicaciones prácticas, e incluso mejorar procesos existentes o reemplazar los procesos comúnmente usados por otros que involucren ciertas ventajas a través de lechos fluidizados.

1.5 PRINCIPALES METODOLOGÍAS PARA LA SIMULACIÓN DE LECHOS FLUIDOS

En el modelo de Lagrange para fluidos de dos fases, las ecuaciones de movimiento de Newton para cada partícula individual son resueltas considerando los efectos de las colisiones entre partículas y las fuerzas que el gas ejerce sobre las partículas sólidas. Las colisiones partícula-partícula son modeladas como colisiones entre esferas rígidas (Gera et al. 1998) o como esferas blandas (Kobayashi et al., 2000). El método de los elementos distintos, DEM (Distinct Element Method), es uno de los modelos de trayectorias que calcula la velocidad de las partículas y la trayectoria de éstas para examinar las interacciones con el resto tales como las debidas a las colisiones partícula-partícula (Kaneko et al. 1999). Los modelos de trayectoria se aplican cuando no resulta apropiado ningún modelo de continuidad.

Si bien los modelos DEM permiten estudiar los efectos de diferentes propiedades de las partículas sobre el movimiento del fluido, el requerimiento computacional requerido es muy elevado, motivo por el cual el uso del modelo de Euler-Lagrange está limitado a un número relativamente pequeño de partículas dejando para estos casos la simulación mediante CFD como la más empleada.

Existe otro método conocido por las siglas DBM (Discrete Bubble Model) para simular los lechos fluidizados. Se trata de un código paralelo empleado típicamente para las simulaciones de columnas de lecho. En él se trata cada burbuja como un elemento discreto inmerso en un fluido y se estudia la interacción entre burbujas mediante un modelo que considera la coalescencia, la desintegración y la agrupación de las mismas con el fin de dar una descripción completa de las columnas de lecho empleadas en la industria. El método DBM es la versión simplificada para la interacción gas-líquido del modelo de partícula discreta DEM.

Las simulaciones CFD están basadas en el modelo continuo Euleriano-Euleriano, en el que el gas y la fase sólida tratados como fases interpenetrantes (Pain et al., 2001). En este esquema, el conjunto de las partículas se modela mediante la mecánica de medios continuos. Las partículas sólidas se suelen considerar idénticas con un diámetro y densidad característicos. La idea general de esta formulación es tratar a cada fase de como un continuo que interpenetra con la otra fase, y después construir los balances integrales de la continuidad, momento y energía para las ambas fases bajo las condiciones de contorno adecuadas y las condiciones de salto para las interfaces de fase. Debido a que la fase sólida no tiene ecuación de estado y carece de variables como la viscosidad o la tensión normal (Pain et al., 2001), se han de emplear algunas técnicas de promedio y asumir ciertas hipótesis en el balance de momento de la fase



de sólidos. Los teoremas de promedio se emplean para construir un continuo para cada fase según describe el modelo Euleriano para flujos monofásico y extenderlo después a los flujos multifásicos. Aunque los coeficientes de transporte de la fase gaseosa pueden ser razonablemente representados por los de una corriente monofásica con ciertas modificaciones, los coeficientes de transporte de la fase sólida debe tener en cuenta las interacciones gas-partícula y las colisiones partícula-partícula.

La interacción entre gas y sólido provoca una de las fuerzas dominantes en los balances de momento de cada una de las fases. Este intercambio de esfuerzos se representa mediante una fuerza de arrastre o rozamiento. La fuerza de arrastre en una sola esfera inmersa en un fluido ha sido bien estudiada y existen correlaciones empíricas como, por ejemplo, Clift et al. (1978) y al Birdet. (2002), para un amplia gama de números de Reynolds de partícula. Sin embargo, cuando la partícula se mueve en una mezcla de dos fases, la resistencia se ve afectada por la presencia de otras partículas. En la literatura existen numerosas correlaciones para calcular los coeficientes de intercambio de cantidad de movimiento entre gas y sólidos, incluyendo las de Syamlal y O'Brien (1989), Gidaspow (1994), y Wen and Yu (1966).

Las ecuaciones de intercambio de momento gas-sólido contienen un término adicional para considerar las colisiones entre partículas. La ausencia del término de tensión tangencial en la fase de partículas para la ecuación de movimiento ha conducido a la adopción de diferentes modelos de cierre, incluido el modelo de la teoría cinética (Sinclair y Jackson, 1989; Gidaspow, 1994; Hrenya y Sinclair, 1997). La aplicación de la teoría cinética para modelar el movimiento de la fase densa formada por partículas esféricas consideradas como prácticamente elástico se basa en una analogía con la teoría cinética de los gases densos. Se define una temperatura granular (Θ) para representar la energía cinética de las fluctuaciones de velocidad o la energía resultante de la fluctuación de velocidad de las partículas. En el flujo granular, las fluctuaciones de velocidad de las partículas respecto a la media son el resultado en las colisiones entre las mismas al ser arrastradas por el caudal de gas. La ecuación de temperatura granular de la partícula puede expresarse en términos de producción de las fluctuaciones de esfuerzo cortante, según la disipación de energía en forma de calor por la cinética de colisiones, mediante la disipación debida a colisiones inelásticas provocadas por las turbulencias del fluido y por la disipación de energía por la interacción con el gas (Gidaspow, 1994). Numerosos estudios han demostrado la capacidad de la teoría cinética para abordar el modelado de lechos fluidizados con presencia de burbujas (por ejemplo, Pain et al., 2001; Sinclair and Jackson, 1989; Hrenya and Sinclair, 1997; Ding y Gidaspow, 1990; Gelderbloom et al. 2003).



El coeficiente de restitución cuantifica la elasticidad de las colisiones entre partículas con el valor de 1 para las colisiones totalmente elásticas y 0 para las colisiones completamente inelásticas. Jenkins and Savage (1983) lo empleó para cuantificar la pérdida de energía debido a la colisión entre partículas, algo que no se considera en la teoría cinética clásica. La energía disipada como consecuencia de las colisiones de las partículas granulares inelásticas ha sido calculada para obtener la relación de las fluctuaciones de velocidad en el flujo medio como una función del coeficiente de restitución (Lun et al., 1984). Una disminución en el coeficiente de restitución se traduce en un menor número de colisiones elásticas generando más fluctuaciones de la energía cinética (Goldschmidt et al., 2001). En fluidos compuestos por dos fases densas, el tiempo de interacción de las partículas puede ser mucho mayor que en lechos donde la partícula tenga un tiempo medio de vuelo libre. Así pues, la hipótesis de que un par de partículas completa su interacción antes de interactuar con otra partícula puede no ser válida si la concentración de sólidos aumenta (Zhang and Rauenzahn, 2000).



2. LECHOS FLUIDOS SÓLIDO-AIRE

2.1 DEFINICIÓN DE LECHO FLUIDO

La fluidización es el proceso por el cual partículas sólidas son llevadas a un estado fluido mediante suspensión en un gas o un líquido. Este método de contacto tiene unas propiedades poco usuales que hace que sean objeto de estudio con el fin de conocer las aplicaciones industriales en las que puede resultar útil.

2.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS LECHOS FLUIDOS

El fenómeno de la Fluidización

Si un fluido asciende a través de una fina película de partículas con un caudal bajo, el fluido se filtra por los huecos que dejan las partículas entre ellas. Esto es lo que se conoce como lecho fijo. Sin embargo, al incrementar el caudal las partículas comienzan a separarse, vibrar y colisionar unas con otras. A esto se le llama lecho expandido. Si seguimos aumentando la velocidad, se alcanza un punto en el que las partículas comienzan a suspenderse arrastradas por el fluido en ascensión. En este punto las fuerzas de fricción entre las partículas y el fluido compensan el peso de las mismas, la componente vertical de las fuerzas de presión debidas a las partículas que se encuentran por encima de ellas desaparece y la caída de presión en cualquier sección de lecho iguala al peso del fluido y las partículas en dicha sección. En esta situación, el lecho se encuentra en estado de mínima fluidización.

Generalmente, todos los sistemas gas-sólido se comportan de manera muy similar al sobrepasar el caudal de mínima fluidización; aparecen inestabilidades con formación de grandes burbujas de gas. Con un caudal elevado, la agitación se torna muy violenta y el movimiento de las partículas sólidas es de gran magnitud. Además, el lecho no se expande mucho más allá de su volumen de mínima fluidización. Este tipo de situación se conoce como lecho fluido heterogéneo o lecho fluido burbujeante. En casos excepcionales de sólidos de muy elevada densidad fluidizados por líquidos de baja densidad también se puede observar este comportamiento burbujeante.

Estas burbujas de gas se unen para crecer en su ascensión y, si la profundidad del lecho es lo suficientemente pequeña las burbujas pueden llegar a verse a través del recipiente en el caso de ser de un material transparente. El lecho que se encuentra sobre la burbuja es empujado hacia arriba, como si fuera un pistón y las partículas caen en forma de lluvia hasta que la burbuja finalmente se desintegra.

Al estudiar los lechos fluidos se ha deducido cuál es la velocidad mínima necesaria para obtener un lecho burbujeante llegando a la siguiente expresión, válida para $Re_{p,mf} < 20$:

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 \cdot (\rho_s - \rho_g) g}{150\mu} \cdot \frac{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (1)$$

donde

d_p = diámetro medio de partícula

ρ_s = densidad de la fase sólida

ρ_g = densidad de la fase gaseosa

μ = viscosidad del aire a 20°C

$\epsilon_{mf} = 0,5$ (*Fluidization Engineering, capítulo 3*)

ϕ_s = factor de forma (*Fluidization Engineering, capítulo 3*)

La fase densa de un lecho fluidizado presenta características muy similares en comportamiento a un líquido. Por ejemplo, al depositar objetos ligeros sobre la superficie del lecho, estos flotan. Si el recipiente se inclina, la superficie se mantiene horizontal y cuando se conectan dos lechos sus niveles se igualan. Incluso, la diferencia de presión entre dos puntos del lecho es prácticamente igual a la diferencia de presión estática. Los sólidos se vierten y fluyen de un recipiente a otro como si de un líquido se tratase.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS LECHOS FLUIDOS MEDIANTE SEÑALES DE PRESIÓN

Las fluctuaciones de presión pueden usarse para caracterizar la fluidización [1] pues son medida de la dinámica del fluido. Sin embargo, no es fácil dar una explicación clara del contenido de una señal de presión en una mezcla sólidos-gas. Las muestras de presión se obtienen mediante dos sondas que generalmente se sitúan una sobre la superficie del lecho y la otra en el plénium; se trata de sondas de presión diferenciales.

En este proyecto se comparará el espectro de presión obtenido en distintos puntos del lecho fluido mediante la simulación y los datos experimentales disponibles facilitados por Sergio Sánchez García. Los resultados del dominio de frecuencia de las fluctuaciones de presión se representan mediante un espectro de potencia. En la mayoría de los lechos fluidizados, la frecuencia característica es del orden de 1 a 5 Hz y una secuencia de 10 segundos suele ser suficiente para extraer la información necesaria sobre el comportamiento de éste [2].

Las fluctuaciones de presión se miden sobre distintos puntos del dominio computacional de un lecho fluido y el espectro de potencia de las fluctuaciones de densidad se obtiene mediante un análisis de la transformada de Fourier (FFT) empleando el software comercial MATLAB. Estas fluctuaciones están muy relacionadas con el estado de fluidización en que se encuentra el lecho lo cual es muy importante para garantizar un funcionamiento seguro y estable de la instalación en prevención de las vibraciones que originan los lechos fluidos.

2.3.1 Contexto histórico

Se han llevado a cabo numerosas investigaciones: Hiby [3], Lirag y Littman [4] y Fan et al. [5] midieron las fluctuaciones de presión e investigaron su relación con el comportamiento de las burbujas. Moritomi et al. [6] midió las fluctuaciones de presión en el plénium y en el lecho y formuló las ecuaciones para predecir la frecuencia de las oscilaciones del lecho. Tagashira et al. [7] llevó la investigación más lejos midiendo también sobre el freeboard y el plénium. Kage et al. [8, 9] llegó a la conclusión de que las frecuencias principales que aparecen en el espectro de potencia al medir sobre el plénium mantenían una concordancia con la generación y erupción de burbujas en la superficie del lecho. Basándose en este hecho, la conclusión a la que se llegó es que se puede utilizar el análisis de las fluctuaciones de presión sobre el plénium mediante FFT para conocer la dinámica de la fluidización. Nelson et al. [10] investigó la frecuencia de

burbujeo mediante las señales de presión en cada agujero de un distribuidor con muchos orificios. Wilkinson et al. [11] estableció el método de determinar la velocidad de mínima fluidización a partir de las variaciones de presión y Wey and Shi [12] estudió los efectos de las fluctuaciones en combustiones e incineraciones.

2.3.2 Análisis de espectros

Hay muchos tipos de fluctuaciones de presión en lechos fluidizados; las oscilaciones en la cámara del plénum deben ser incluidas también. Este tipo de oscilaciones, que existen cuando la resistencia del distribuidor es baja y el tamaño del plénum es grande, han sido estudiadas por varios autores [13, 14]. En los equipos comerciales se suelen eliminar este tipo de oscilaciones debido a las cargas mecánicas impuestas sobre el distribuidor y a una pobre fluidización.

Cuando el coeficiente de pérdidas en el distribuidor aumenta aparece lo que se conoce como el modo de fluidización por burbuja. En él, las fluctuaciones de presión son generadas por el nacimiento de burbujas en el lecho que se colapsan después en la superficie.

Un análisis espectral muestra que las variaciones de presión en el lecho burbujeante son aleatorias y poseen una amplia gama de frecuencias pero existe una frecuencia predominante correspondiente con el valor máximo que aparece en el espectro. Más allá de la teoría [15] y los estudios experimentales [16], el mecanismo de fluctuación asociado al tránsito de burbujas por las proximidades del sensor de presión no interfiere con la frecuencia fundamental ya que el número de burbujas emergentes cae a lo largo de la altura del lecho debido a su coalescencia [17], mientras que la frecuencia fundamental, medida en cualquier punto del lecho, es la misma. La amplitud de la fluctuación de presión muestra pequeñas variaciones a lo largo del lecho debido a que las burbujas aumentan de tamaño. Además, las fluctuaciones aparecen con bastante sincronía a lo largo del lecho.

Para observar adecuadamente la relación que existe entre las fluctuaciones de presión y el movimiento de las burbujas de gas, los experimentos se suelen llevar a cabo con dispositivos transparentes para que puedan emplearse sistemas de captura óptica. Tal y como se muestra en los oscilogramas (Fig. 2.1 (a)), las caídas de presión tanto en la zona más alta como en la más baja del lecho se producen de forma simultánea en el instante en el que emerge la burbuja de gas. La ruptura de una burbuja crea un cráter en la superficie del lecho y, por tanto, la altura de éste en ese

punto es menor. De forma conjunta, la resistencia del gas decrece también provocando una caída de presión simultáneamente en el lecho y en el plénum. [26]

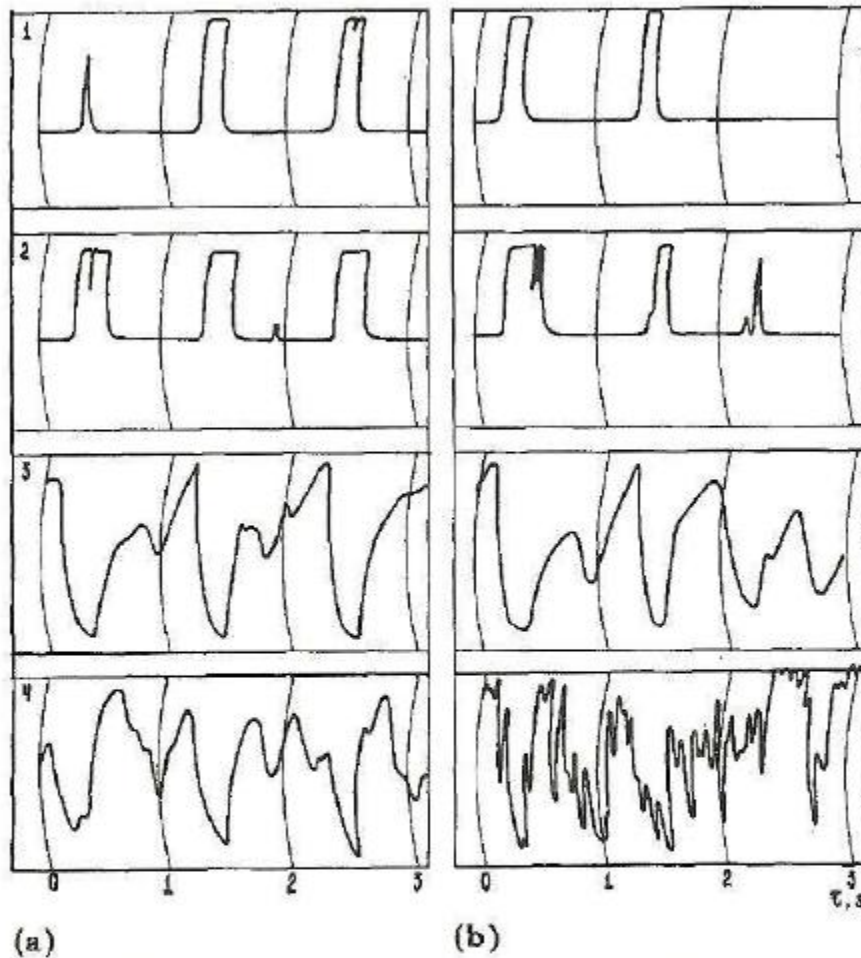


Figura 2.1: Adquisición sincrónica de sensores de tipo fotodiodo (1, 2) y de medida de presión (3,4)

La presencia de burbujas en un punto determinado del lecho reduce la resistencia en la zona por donde realiza el ascenso pero en menor medida ya que cuando las burbujas colapsan en la superficie la resistencia del gas en la zona de colapso desaparece. El mínimo de presión se da en el área que queda bajo la burbuja que colapsa. La incipiente caída de presión corresponde con el momento de mayor agitación de la superficie del lecho provoca por el estallido de la burbuja.

Para demostrar el efecto del paso de una burbuja sobre las variaciones de presión, se incorpora un inyector en el centro del distribuidor que mantiene un flujo de burbujas para fluidizar el lecho en un punto determinado. De esta forma, todas las burbujas pasan por las proximidades del transductor de presión instalado cerca del distribuidor. La presión resultante está constituida por fluctuaciones de gran escala y baja frecuencia debidas a la aparición de burbujas y por fluctuaciones de pequeña amplitud pero alta frecuencia debidas a la salida del gas en el inyector (Fig. 2.1 (b)).

3. SIMULACIÓN DE LECHOS FLUIDOS MEDIANTE TÉCNICAS DE CFD

Se ha aplicado la formulación de Euler para fluidos multifásicos. Este modelo tiene en cuenta la conservación de la masa y el momento para ambas fases. La teoría cinética del flujo granular utilizada, que considera la conservación de la energía de fluctuación sólidos, sirvió para cerrar las ecuaciones teniendo en cuenta los términos de tensión entre los sólidos. Son necesarias las ecuaciones constitutivas para completar las relaciones que gobiernan la simulación. Los coeficientes de fuerza se calculan mediante las funciones de arrastre. En este estudio se han aplicado las funciones Syamlal-O'Brien (1989) y Gidaspow (1994) con un coeficiente de restitución de las partículas de 0,9. A continuación se especifican las correlaciones empleadas por cada uno de los modelos además de otras ecuaciones constitutivas

3.1 CONCEPTO DE DOS FLUIDOS INTERPENETRANTES

En el modelo multifásico gas-sólido, abordar el problema a través del estudio de cada partícula por separado resulta muy costoso computacionalmente (método Lagrangiano). Es por ello que se recurre a los modelos CFD, basados principalmente en modelos de dos fases donde se aplica la teoría cinética de los fluidos granulares derivada de la teoría cinética de los gases (Chapman y Cowling, 1970 [18]). En este tipo de métodos, ambas fases son tratadas como un medio continuo e interpenetrante. El modelo fue propuesto por Anderson y Jackson (1967) [19] y Prichett et al. (1978) [20] y especifica que la viscosidad del gas y de los sólidos es nula. El comportamiento físico, dominado por la fuerza de arrastre existente entre la fase gas y la fase sólidos y que entre otras cosas provoca la formación de burbujas, queda de esta forma predicho.

Para contrarrestar el efecto de eliminar la viscosidad, impidiendo la utilización del método en casos como por ejemplo la descripción de las fuerzas en tubos, Jackson (1985) [21] incorporó un término viscoso sobre la fase densa. Sin embargo, desafortunadamente no se han encontrado valores físicos realistas para esta viscosidad así como para la tensión de los sólidos. Jenkins y Savage (1983)[22], Lun et al. (1984)[23] y Ding y Gidaspow (1990)[24] describieron la fase de sólidos como un fluido sin intersticio. Esta aproximación está basada en la teoría cinética de las fases densas, como determinó Chapman y Cowling (1970) [25]. En ésta, el concepto de temperatura empleado en la termodinámica es reemplazado por la temperatura de fluido granular. La viscosidad de los sólidos así como la tensión son función de esta temperatura granular, la cual varía con el tiempo y la posición en el lecho fluido.

3.2 ECUACIONES EULERIANAS DE CONSERVACIÓN PARA FLUJOS GRANULARES

Las ecuaciones de conservación de la masa de gas (g) y sólida (s) fases:

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g) + \nabla(\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s) + \nabla(\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s) = 0 \quad (3)$$

Ecuaciones de conservación de energía de las fases gaseosa y sólida:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g) + \nabla(\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g^2) \\ &= -\alpha_g \cdot \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_g + \alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{g} + K_{gs} \cdot (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (4)$$

3.3 MODELOS SEMIEMPÍRICOS DE CIERRE DE LAS ECUACIONES

Coefficientes de intercambio

Función de arrastre (Gidaspow)

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \cdot c_D \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_g \cdot \rho_g \cdot |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \cdot \alpha_g^{-2,65} \quad \text{para} \quad \alpha_g > 0,8 \quad (6)$$

$$K_{gs} = 150 \cdot \frac{\alpha_s^2 \cdot \mu_g}{\alpha_g \cdot d_s^2} + 1,75 \cdot \frac{\alpha_s \cdot \rho_g \cdot |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad \text{para} \quad \alpha_g \leq 0,8 \quad (7)$$

donde

$$c_D = \frac{24}{\alpha_g \cdot Re_s} \cdot [1 + 0,15 \cdot (\alpha_g \cdot Re_s)^{0,687}] \quad (8)$$

y

$$Re_s = \frac{\rho_g \cdot d_s \cdot |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (9)$$

Función de arrastre (Syamlal-O'Brien)

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_g \cdot \rho_g}{v_{r,s}^2 \cdot d_s} \cdot c_D \cdot \left(\frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) \cdot |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (10)$$

Donde

$$c_D = \left(0,63 + \frac{4,8}{\sqrt{Re_s/v_{r,s}}} \right)^2 \quad (11)$$

y

$$v_{r,s} = 0,5 \cdot (A - 0,06 \cdot Re_s + \sqrt{(0,06 \cdot Re_s)^2 + 0,12 \cdot Re_s \cdot (2 \cdot B - A) + A^2}) \quad (12)$$

Con

$$A = \alpha_g^{4,14} \quad B = \alpha_g^{1,28} \quad \text{si} \quad \alpha_g \leq 0,8$$

ò

$$A = \alpha_g^{4,14} \quad B = \alpha_g^{2,65} \quad \text{si} \quad \alpha_g > 0,8$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s) + \nabla (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s^2) = \\ -\alpha_s \cdot \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_s + \alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{g} + K_{gs} \cdot (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (13)$$

Ecuaciones constitutivas

Tensor de tensiones de la fase sólida

$$\bar{\bar{\tau}}_s = \alpha_s \cdot \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \cdot \nabla \vec{v}_s \cdot \bar{\bar{I}} \quad (14)$$

Función de distribución radial

$$g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (15)$$

3.4 ECUACIÓN DE LA TEMPERATURA GRANULAR

De forma equivalente al concepto termodinámico clásico de temperatura en gases, la temperatura granular puede ser definida como medida de la energía de las fluctuaciones de velocidad de las partículas sólidas.

La temperatura granular viene definida por la siguiente expresión:

$$\Theta_s = \frac{1}{3} v'^2 \quad (16)$$

donde Θ_s es la temperatura granular y v' es la velocidad de fluctuación de las partículas.

Coeficiente de difusión de temperatura granular (Syamlal-O'Brien)

$$K_{\Theta_s} = \frac{15 \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \alpha_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{4 \cdot (41 - 33\eta)} \cdot \left[1 + \frac{12}{5} \cdot \eta^2 \cdot (4\eta - 3) \alpha_s \cdot g_{0,ss} + \frac{16}{15\pi} (41 - 33\eta) \eta \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} \right] \quad (17)$$

siendo

$$\eta = 0,5(1 + e_{ss}) \quad (18)$$

Coeficiente de difusión de temperatura granular (Gidaspow)

$$K_{\Theta_s} = \frac{150 \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{384 \cdot (1 + e_{ss}) \cdot g_{0,ss}} \cdot \left[1 + \frac{6}{5} \alpha_s \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2\rho_s \cdot d_s \cdot \alpha_s^2 \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}} \quad (19)$$

Energía de disipación por colisiones

$$\gamma_{\Theta m} = \frac{12(1-e_{ss}^2) \cdot g_{0,ss}}{d_s \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \rho_s \cdot \alpha_s^2 \cdot \Theta_s^{3/2} \quad (20)$$

Energía cinética de transferencia

$$\phi_{gs} = -3 \cdot K_{gs} \cdot \Theta_s \quad (21)$$

Presión de la fase sólida

$$p_s = \alpha_s \cdot \rho_s \cdot \Theta_s + 2 \cdot \rho_s \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \alpha_s^2 \cdot g_{0,ss} \cdot \Theta_s \quad (22)$$

Viscosidad cortante de la fase sólida

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (23)$$

Viscosidad de colisión entre sólidos

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \cdot \alpha_s \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \quad (24)$$

Viscosidad por fricción de la fase sólida

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \cdot \sin \phi}{2 \cdot \sqrt{I_{2D}}} \quad (25)$$

Viscosidad cinemática (Syamlal-O'Brien)

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{6(3 - e_{ss})} \cdot \left[1 + \frac{2}{5} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot (3e_{ss} - 1) \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} \right] \quad (26)$$

Viscosidad cinemática (Gidaspow)

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{96 \cdot \alpha_s (1 + e_{ss}) \cdot g_{0,ss}} \cdot \left[1 + \frac{4}{5} \cdot g_{0,ss} \cdot \alpha_s \cdot (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (27)$$

Viscosidad volumétrica

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \cdot \alpha_s \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \quad (28)$$

Fluctuación energética de conservación de las partículas sólidas

$$\frac{3}{2} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho_s \cdot \alpha_s \cdot \Theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \cdot \alpha_s \cdot \vec{v}_s \cdot \Theta_s) \right] =$$

$$(-p_s \cdot \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s) : \nabla \cdot (k_{\Theta s} \cdot \nabla \Theta_s) - \gamma_{\Theta s} \quad (29)$$

3.5 SIMULACIÓN DE LECHOS FLUIDOS MEDIANTE EL CÓDIGO FLUENT

La resolución matemática de las ecuaciones que gobiernan la simulación llevada a cabo por FLUENT está basada en el método de los volúmenes finitos. El método de volúmenes finitos es un procedimiento de discretización en el que se recorre el camino inverso al utilizado en la obtención de las ecuaciones diferenciales de transporte. En éstas se parte de las relaciones integrales en un volumen fluido (finito), obteniéndose las relaciones para una partícula fluida al reducir el volumen de integración hasta el asociado a ésta (infinitesimal). El método de volúmenes finitos recorre el sentido deductivo contrario obteniendo balances finitos a partir de los asociados a partículas infinitesimales. Para ello integra la ecuación diferencial original sobre un volumen finito, es decir, un trozo de intervalo (1D), superficie (2D) o volumen (3D) cuya forma concreta depende de la malla y del sistema de coordenadas que se esté empleando. Independientemente de la dimensionalidad del problema, se sigue hablando de volúmenes finitos cuando uno se refiere a las subdivisiones del dominio. Lo que se acaba teniendo es un balance (entrada + aportación \rightarrow salida) en cada una de las zonas discretas en las que se ha subdividido el dominio global. De aquí que el proceso comience con la decisión sobre el troceado del dominio, es decir, número, tamaño, y ratio de expansión/contracción de los volúmenes de discretización. Después de la integración, el procedimiento postula variaciones internodales de la solución que permiten sustituir las derivadas por relaciones algebraicas entre valores nodales.

Debido al carácter de los lechos fluidizados, las simulaciones tratan un problema no estacionario. Otros autores que han estudiado las simulaciones CFD sobre lechos fluidizados han concluido que el paso de tiempo adecuado para resolver este tipo de casos es de $5 \cdot 10^{-4}$ segundos, por lo que será en punto de partida para desarrollar este proyecto. Dada la complejidad de este tipo de simulaciones y la gran variabilidad que existe entre dos casos se puede hablar de una media de setenta iteraciones por cada paso de tiempo. El equipo informático disponible ha sido convencional, por lo que la velocidad de procesado ha supuesto un hándicap a la hora de cumplir los plazos previstos. Estamos hablando de aproximadamente $1,5 \cdot 10^5$ iteraciones por día, lo que se traduce en 1 segundo diario.

Los sistemas de discretización se han establecido de segundo orden para lograr la convergencia en la mayoría de los pasos de tiempo.

4. MODELO COMPUTACIONAL

En este apartado se desarrollara la consecución de los casos estudiados así como las características de cada uno de ellos. A grandes rasgos se puede dividir el proyecto en tres bloques o apartados atendiendo a los objetivos marcados en cada una de las etapas. Para todos los apartados ha sido necesario crear distintos tipos de malla sobre los que FLUENT pueda trabajar. El Software empleado en la creación de dicho modelos es GAMBIT, un software comercial compatible con el formato de FLUENT.

4.1 BLOQUE 1: REPRODUCCIÓN Y COMPARACIÓN DE UN ESTUDIO COMPUTACIONAL SOBRE UN LECHO FLUIDIZADO

El objetivo de este apartado es conocer el comportamiento de los lechos fluidizados en columnas de 2D y evaluar los resultados al emplear la formulación de Syamlal-O'Brien o la formulación del modelo de Gidaspow durante el proceso de iteración. Los resultados alcanzados en esta etapa serán comparados con los publicados en el artículo a modo de comprobación y validación de los mismos y servirán para escoger la formulación y el paso de tiempo más adecuados para las simulaciones siguientes.

4.1.1 Modelo físico y dominio computacional

En este primer bloque se ha simulado el mismo experimento que realizaron en el departamento de Química y Biología de la Universidad de British Columbia: una columna 2D de 1m de altura y 0,28m de ancho, con una altura inicial de la fase densa en reposo de 0,4m (Fig. 4.1). La inserción de aire se realiza desde toda la superficie inferior se forma constante y uniforme a través de un distribuidor perforado con un área de apertura del 1,2% del área total.

La fase densa está compuesta por esferas de vidrio de $275\mu\text{m}$ de diámetro, d_p , y densidad 2500 kg/m^3 , con una fracción de volumen de 0,6 y un coeficiente de restitución, e_{ss} , de 0,9. La fluidización se lleva a cabo bajo condiciones ambiente, por lo tanto, la fase gaseosa es aire atmosférico de densidad $1,225\text{ kg/m}^3$.

La figura 4.1 muestra el esquema de la instalación reproducida en la simulación.

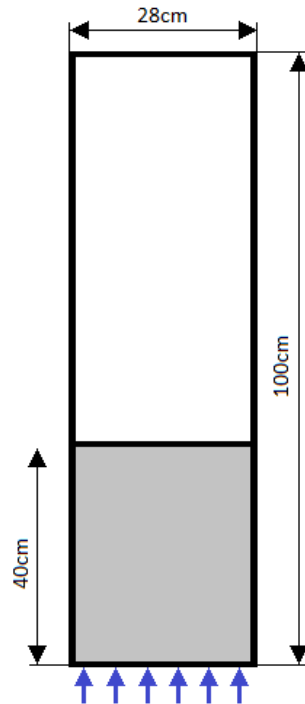


Figura 4.1: Esquema de la instalación para la reproducción y comparación de un estudio computacional sobre un lecho fluidizado

A continuación se muestra una tabla donde se resume el dominio computacional de este primer bloque (Tabla 4.1).

Descripción	Valor
Densidad de partículas de vidrio	2500 kg/m ³
Densidad del gas (aire)	1,225kg/m ³
Diámetro medio de partícula, d_p	275μm
Coeficiente de restitución, e_{ss}	0,9
Empaquetamiento inicial de sólidos	0,60
Anchura de la columna	0,28m
Altura del contenedor	1m
Altura del lecho inicial	0,4m
Tamaño de la celda de malla	5·10 ⁻³ m
Condición de contorno de entrada	Velocity
Condición de contorno de salida	Outflow

Tabla 4.1: Resumen del dominio computacional del bloque 1

4.1.2 Condiciones operativas

En este primer bloque de casos no se consideran los efectos del plénum ni del distribuidor sobre el modelo de entrada de aire al lecho. Por tanto, la entrada del aire al lecho se realiza a través de toda la superficie inferior del mismo de forma constante y uniforme. Esto es una simplificación ideal de un modelo de lecho fluidizado real ya que en la realidad no es posible garantizar un caudal de aire tan uniformemente repartido pues, como se estudiará más adelante, los plénum proporcionan al flujo de aire unas características particulares.

4.1.3 Mallado del dominio computacional

La creación de la malla soporte se ha realizado mediante GAMBIT, un software que permite especificar la geometría, dimensiones, tipo de mallado y condiciones de contorno del modelo, aunque algunos de estos parámetros se han modificado después en la interfase de FLUENT. Con el fin de no provocar problemas graves de inestabilidad y divergencia se ha seguido el criterio del CFL, que especifica que existe un valor máximo que no se debe sobrepasar a la hora de realizar la malla. El método consiste en lo siguiente:

$$CFL < CFL_{CRÍTICO} \quad \text{siendo} \quad CFL = \frac{\Delta t \cdot v_c}{\Delta z} \quad (30)$$

donde

$CFL_{CRÍTICO}$ del orden de 0,5

Paso de tiempo: $\Delta t = 0,001 / 0,0005s$

Velocidad de entrada del gas: $v_c = 0,38m/s$

Altura de celda: $\Delta z = 0,005m$

El resultado obtenido es $CFL = 0,038$ por lo que es adecuado este tamaño de celda ($0,038 < CFL_{crítico}$). Esta comprobación se aplica también sobre el resto de modelos realizados.

Así pues, todas las simulaciones de este apartado se han realizado sobre una malla de 11180 nodos. No se llevó a cabo ningún refinamiento ya que las pruebas iniciales con mallas refinadas en la parte inferior del lecho provocaban inestabilidades, haciendo imposible evitar la divergencia. Por ese motivo la malla empleada es tamaño uniforme a lo largo de toda la superficie.

4.1.4 Descripción de los casos

El objetivo de este bloque es estudiar el grado de influencia de escoger un modelo de formulación u otro a la hora de obtener los resultados. También se ha variado la velocidad de inyección del aire a partir de la velocidad de mínima fluidización (U_{mf}) y el paso de tiempo de cada salto de iteraciones. La forma de evaluar la influencia de estos parámetros será mediante los perfiles de fracción volumétrica de sólidos, el grado de expansión del lecho fluido, la caída de presión en la columna del lecho, la aparición de burbujas de aire sobre la superficie del lecho, la velocidad vertical de las partículas sólidas y el tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control centrado en el lecho.

De esta forma se han realizado cuatro simulaciones resumidas en la tabla siguiente [tabla 4.2]:

CASO	Formulación	U/ U_{mf}	Paso de tiempo (s)
1	Syamlal-O'Brien	2	10^{-3}
2	Syamlal-O'Brien	2	$5 \cdot 10^{-4}$
3	Gidaspow	2	10^{-3}
4	Gidaspow	1	10^{-3}

Tabla 4.2: Resumen de los casos bloque 1: Casos 1 a 4

4.2 BLOQUE 2: INCORPORACIÓN DE PLÉNUM Y DISTRIBUIDOR

En este bloque se caracterizará el comportamiento del lecho al incorporar un plénum y un distribuidor de aire como método de inserción del mismo. La técnica para llevar a cabo los objetivos planteados es el estudio de las señales de presión y el flujo de burbujas de aire que transcurren por el lecho. Se verá la influencia de las condiciones de contorno y operativas seleccionadas sobre los resultados mostrando la gran importancia de analizar este tipo de componentes en las simulaciones de CFD que se realicen sobre lechos fluidizados.

4.2.1 Modelo físico y dominio computacional

Las características de la columna de lecho se mantienen iguales a las del apartado anterior, es decir, una columna 2D de 1m de altura y 0,28m de ancho, con una altura inicial del lecho de 0,4m (Fig. 4.5). La fase densa vuelve a estar formada por esferas de vidrio de $275\mu\text{m}$ de diámetro y densidad 2500 kg/m^3 , con una fracción volumétrica 0,6. La fluidización se mantiene en condiciones ambiente, siendo la fase gaseosa aire atmosférico de densidad $1,225\text{ kg/m}^3$.

En este apartado se ha incorporado al modelo un plénum y un distribuidor de aire para el suministro de gas al lecho. El plénum es una caja situada en la parte inferior del distribuidor al que se proporciona un caudal de aire. Existen muchas soluciones a la hora de introducir ese aire. Un ejemplo es el que se empleó en el Departamento de Conversión de Energía de la Universidad Tecnológica de Chalmers [27], experimento publicado en mayo de 2001. En él se empleaba un plénum tridimensional con una entrada en el frontal y la columna del lecho situada en el extremo contrario (Fig. 4.3).

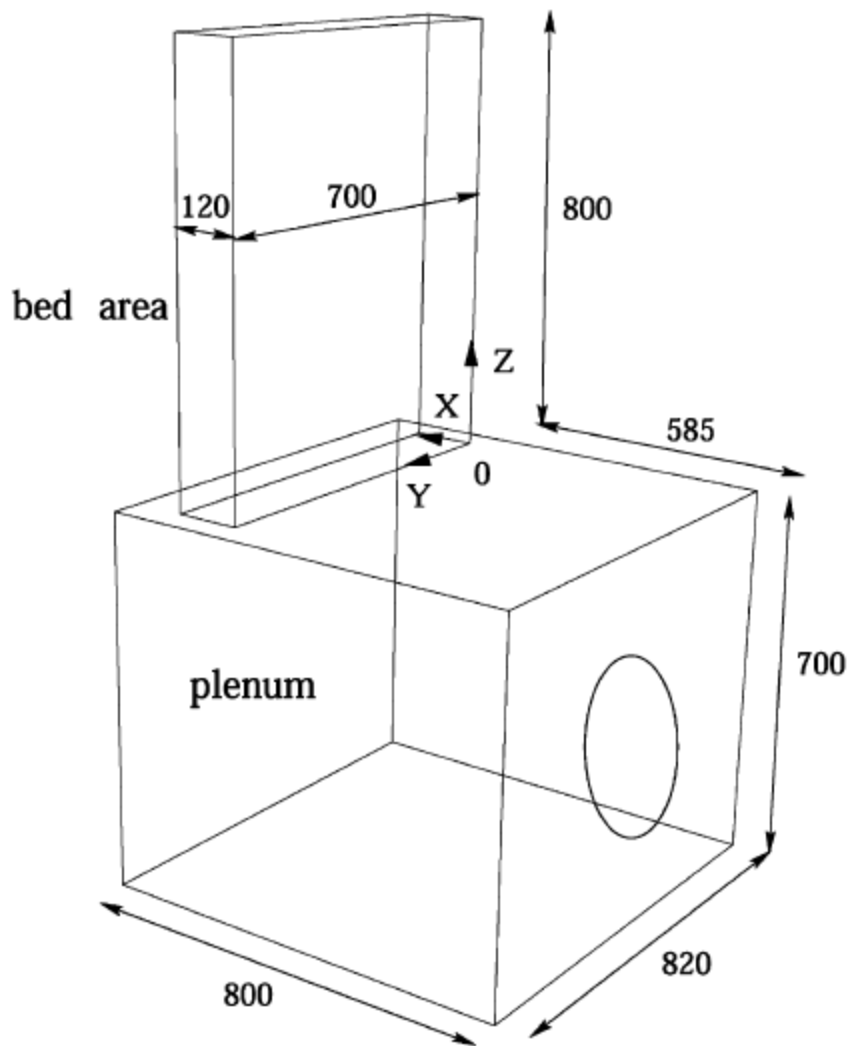


Figura 4.3: Modelo de plénium empleado en el Departamento de Conversión de Energía de la Universidad Tecnológica de Chalmers

Otra posible solución es la adoptada por el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid. En este caso se trata de un plénium bidimensional en que la entrada de aire se realiza por los laterales mediante un dispositivo cilíndrico perforado en su superficie inferior que reparte el aire de la forma más uniforme posible. El siguiente esquema, en el que no se ha mantenido las proporciones geométricas ya que sólo tiene carácter ilustrativo, muestra su diseño así como las características que adopta el flujo a su paso por el sistema (Figura 4.4):

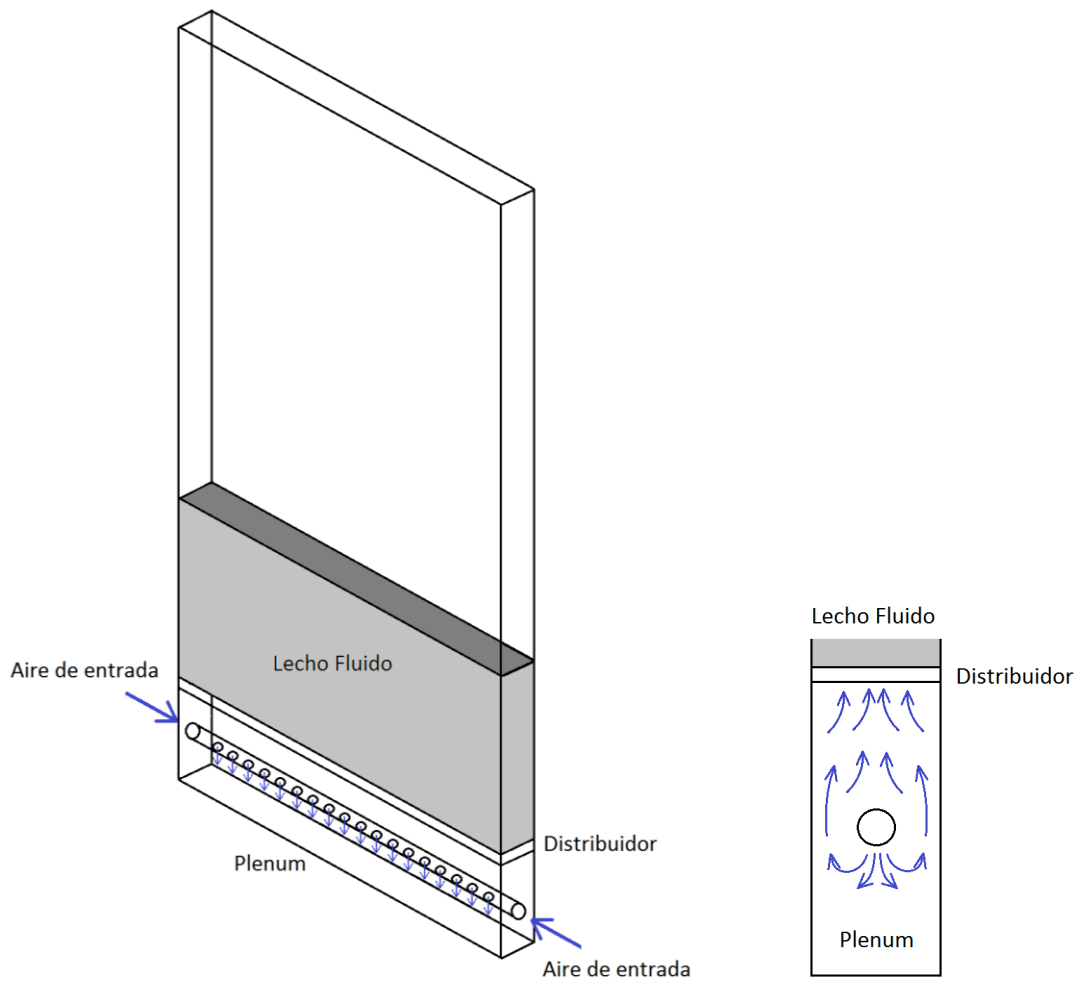


Figura 4.4: Modelo de plenum empleado en el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la UC3M

Dado que las simulaciones que se están llevando a cabo en el presente documento son modelos de dos dimensiones, la opción más acertada para modelar el plenum es la empleada por la UC3M. De este modo, el esquema de la instalación (Fig. 4.5) es el siguiente: una columna de 1 metro de altura y 28 cm de ancho y bajo éste un distribuidor de 1cm de espesor y un plenum de 10 cm de alto.

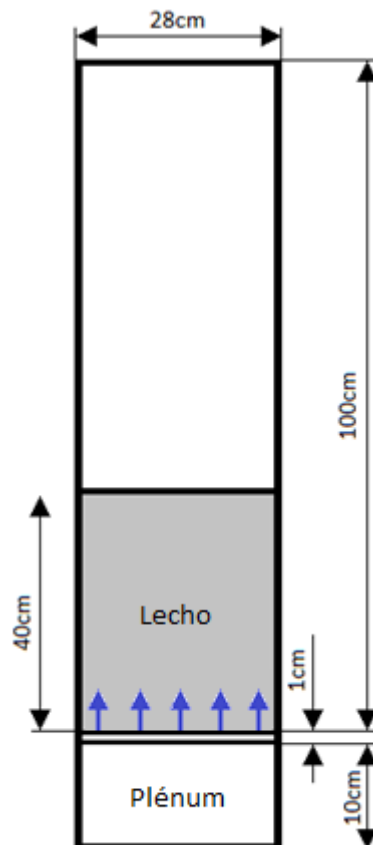


Figura 4.5: Esquema de la instalación con incorporación del plénium y del distribuidor

Gracias a los conocimientos adquiridos en la primera fase del proyecto, todas las simulaciones de este apartado se llevaron a cabo mediante la formulación de Gidaspow ya que resultaba ser menos agresiva, favoreciendo la no aparición de problemas de inestabilidad y divergencia.

A continuación se muestra una tabla donde se resume el dominio computacional de este primer bloque (tabla 4.3).

Descripción	Valor
Densidad de partículas de vidrio	2500 kg/m ³
Densidad del gas (aire)	1,225kg/m ³
Diámetro medio de partícula, d_p	275μm
Coeficiente de restitución, e_{ss}	0,9
Empaquetamiento inicial de sólidos	0,60
Anchura de la columna	0,28m
Altura del contenedor	1m
Altura del lecho inicial	0,4m
Tamaño de la celda de malla	5·10 ⁻³ m
Condición de contorno de entrada	Velocity
Condición de contorno de salida	Outflow
Espesor del distribuidor	1cm
Altura del plénum	10cm

Tabla 4.3: Resumen del dominio computacional del bloque 2

4.2.2 Condiciones operativas:

La presencia del plénum y el distribuidor es necesaria siempre que se realizan experimentos sobre lechos fluidos ya que hay que poder controlar las condiciones de entrada del gas en cualquier proceso que se lleve a cabo.

4.2.2.1 El distribuidor de aire

La presencia de un distribuidor implica que se debe tener en cuenta la caída de presión existente en este tipo de elementos. La curva de pérdida de carga (Fig. 4.6) viene dada en función de la velocidad de fluidización, U , por la siguiente expresión [25]:

$$\Delta p = 32800 \cdot U^2 [\text{Pa}] \quad (31)$$

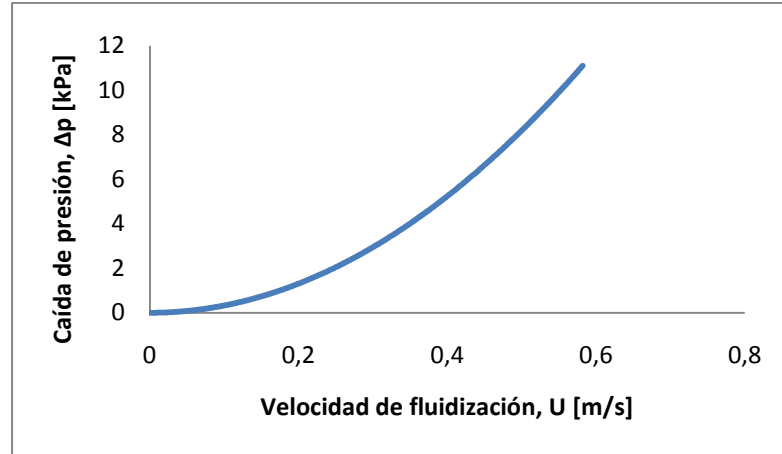


Figura 4.6: Caída de presión en el distribuidor [25]

Esta curva de caída de presión para el distribuidor en función de la velocidad es válida cuando se quiere conseguir que la caída de presión sea la mitad de la presión que produce la columna de lecho en estado de reposo (ecuación 32).

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot H_0 \quad (32)$$

Siendo n el número de fases, en este caso 2, ρ la densidad de cada fase y H_0 la altura del lecho en estado de reposo. Dado que la densidad de las partículas sólidas es mucho mayor que la del aire, la ecuación anterior se simplifica en la siguiente expresión (ecuación 33):

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho_s \cdot g \cdot H_0 \cdot \varepsilon \quad (33)$$

Donde ε es la fracción de vacío del lecho de partículas en estado fijo y tiene un valor de 0,6. El resultado es una caída de presión de 2943 Pa.

En los casos en los que se incluye la caída de presión se este valor para determinar los coeficientes necesarios para introducir en el código FLUENT y simular de este modo la caída de presión que tiene lugar en los distribuidores reales.

Por otro lado, las características geométricas del distribuidor hacen que el aire que pase a través de él tenga una velocidad con una única componente vertical y además impide la caída de las partículas sólidas al interior del plénum. Resulta fundamental tener en cuenta esta característica y por tanto es necesario imponer una condición de contorno que permita simularlo. En una primera aproximación se recurrió a la opción de definir manualmente una función que impidiera el paso de los sólidos a



través de ella pero los resultados fueron desfavorables. Por este motivo se decidió emplear una opción disponible en el código fuente de FLUENT. Se trata de imponer mediante la pestaña de “porous zone” que aparece sobre el menú de condiciones de contorno en el entorno de FLUENT la condición de que toda partícula que se aproxime a la interfase del distribuidor transforme en nula su velocidad en ambas direcciones. De este modo todas las partículas vuelven a ser lanzadas al lecho.

Esta posibilidad también permite eliminar la componente horizontal de la velocidad del aire, simulando fielmente las condiciones de paso de gas a través de un distribuidor con orificio verticales perforados.

4.2.2.2 El plénum

Como se expuso en el apartado 4.2.1, existen diversos modelos de plénum. Las dos geometrías consideradas resultan tan complejas que el proyecto sería demasiado costoso desde el punto de vista computacional para la simulación mediante CFD, por lo que queda automáticamente desechado. El fundamento de incorporar este tipo de dispositivos al plénum no es otro que el de repartir lo más homogéneamente posible la entrada del gas al lecho. Es por ello que en este documento se modelará la entrada de aire basándose en el segundo modelo mencionado (Fig. 4.4), ya que en el primer caso (Fig. 4.3) fue necesaria una simulación en 3D. La reproducción del modelo de plénum 2D se llevó a cabo mediante dos planteamientos distintos:

Modelo A:

La entrada se realiza desde los dos laterales del plénum (Fig. 4.7). Como se verá más adelante, este modelo resulta poco realista ya que la simulación 2D impide la relajación sobre el flujo en la colisión de las dos corrientes, creándose una serie de torbellinos que no existen en la realidad y que dificultan el proceso de cómputo, ver figura 5.23.

Modelo B:

La entrada se realiza desde la superficie inferior del plénum. Este modelo es la idealización del dispositivo empleado por el Departamento de Ingeniería Térmica y de

Fluidos de la UC3M. Sin embargo, como se comentará más adelante, no resulta fácil comenzar la simulación, teniendo que recurrir a un modelo mixto para conseguir los objetivos, ver figura 4.8.

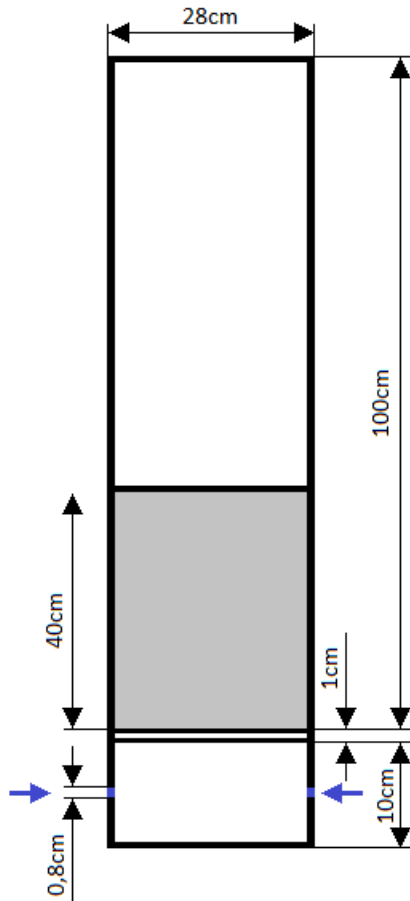


Figura 4.7: Modelo de plénum A

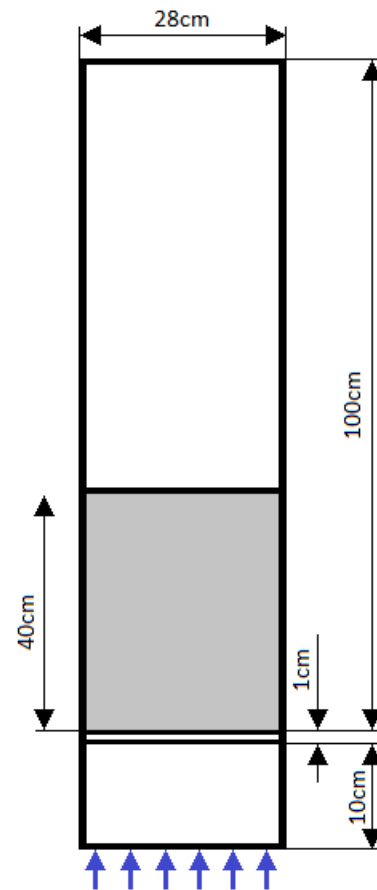


Figura 4.8: Modelo de plénum B

4.2.3 Mallado del dominio computacional

A la hora de realizar la malla se tiene que tener en cuenta que el código FLUENT no es capaz de mantener correctamente el caudal de entrada de aire si el tamaño de las celdas de malla es demasiado grande. Por este motivo es imprescindible realizar un refinamiento sobre la malla en las zonas de entrada del modelo de malla A (Fig. 4.9). El tamaño de esta nueva malla es de 11664 nodos.

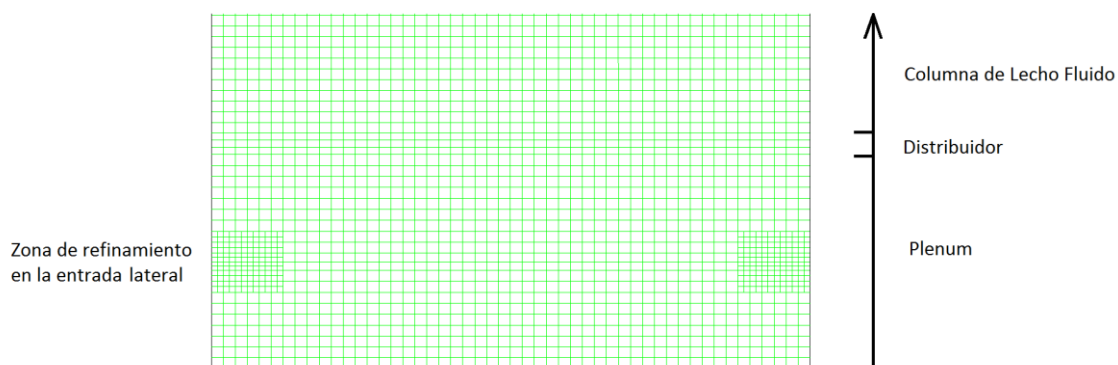


Figura 4.9: Detalle del refinamiento de la malla A en las entradas al plénum

4.2.4 Descripción de los casos

En este bloque se llevarán a cabo cinco simulaciones que serán combinación de variar la pérdida de carga en el distribuidor, la velocidad de fluidización y el modelo de entrada del gas al distribuidor.

Gracias a los conocimientos adquiridos en la primera fase del proyecto, todas las simulaciones de este apartado se llevaron a cabo mediante la formulación de Gidaspow ya que resultaba ser menos agresiva, favoreciendo la no aparición de problemas de inestabilidad y divergencia. El paso de tiempo empleado en este conjunto de simulaciones es de $5 \cdot 10^{-4}$ segundos salvo en el caso de 2,5 veces la velocidad de mínima fluidización, en el que fue necesario emplear un paso de tiempo de $2,5 \cdot 10^{-4}$ segundos para lograr unos resultados adecuados y poder solucionar en parte los problemas de inestabilidad y divergencia que provoca una velocidad de fluidización tan elevada.

De este modo, las simulaciones llevadas a cabo son las siguientes (tabla 4.4):

CASO	Modelo de plénium	U/U _{mf}	Pérdida de carga (%)	Formulación	Paso de tiempo (s)
5	A	2	0	Gidaspow	$5 \cdot 10^{-4}$
6	B	2	0	Gidaspow	$5 \cdot 10^{-4}$
7	B	1,5	50	Gidaspow	$5 \cdot 10^{-4}$
8	B	2	50	Gidaspow	$5 \cdot 10^{-4}$
9	B	2,5	50	Gidaspow	$2,5 \cdot 10^{-4}$

Tabla 4.4: Resumen de casos bloque 2: Casos 5 a 9

Con la simulación de estos casos se tratará de estudiarlos siguientes factores:

- El mejor método de entrada de aire comparando los modelos de plénium A y B (CASOS 5 y 6 respectivamente).
- La influencia de imponer una caída de presión en el distribuidor correspondiente al 50% de la presión estática del lecho en estado de reposo, mediante los CASOS 6 y 8.
- Comportamiento del lecho al variar la velocidad de fluidización, gracias a los CASOS 7, 8 y 9.

4.3 BLOQUE 3: REPRODUCCIÓN Y COMPARACIÓN DEL CASO LLEVADO A CABO EN LA UC3M

En este último apartado compararemos los resultados experimentales, logrados por Sergio Sánchez Delgado en el laboratorio de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid, con los obtenidos por medio de la simulación CFD con el fin de validar los modelos computacionales empleados.

4.3.1 Modelo físico y dominio computacional

Se trata de una columna 2D de 2 metros de altura y medio metro de ancho, lo que supone un aumento del 35% sobre las dimensiones de los casos anteriores. En esta ocasión las partículas de la fase sólida tienen un diámetro medio de $700\ \mu\text{m}$ pero se mantienen con una densidad de 2500kg/m^3 . La altura del lecho en reposo es de 45 cm y la fracción de empaquetamiento máximo vuelve a ser de 0,6.

Gracias a la experiencia adquirida en los bloques I y II, es posible incorporar en este apartado un plénum y un distribuidor, de 20 y 2 cm de altura respectivamente, algo que no se había hecho hasta ahora y que puede mostrar la validez del modelo simplificado del dispositivo empleado en el experimento. Es por ello que este apartado posee un gran interés debido a la escasa documentación existente al respecto.

La simulación del dispositivo de la entrada de aire al lecho se lleva a cabo mediante el modelo de plénum B por ser el modo encontrado para modelar la situación real.

A continuación se muestra una tabla donde se resume el dominio computacional del bloque 3 (tabla 4.5):

Descripción	Valor
Densidad de partículas de vidrio	2500 kg/m ³
Densidad del gas (aire)	1,225kg/m ³
Diámetro medio de partícula, d_p	700μm
Coeficiente de restitución, e_{ss}	0,9
Empaquetamiento inicial de sólidos	0,60
Anchura de la columna	0,50m
Altura del contenedor	2m
Altura del lecho inicial	0,45m
Tamaño de la celda de malla	5·10 ⁻³ m
Condición de contorno de entrada	Velocity
Condición de contorno de salida	Outflow
Espesor del distribuidor	1cm
Altura del plénum	10cm

Tabla 4.5: Resumen del dominio computacional del bloque 3

4.3.2 Condiciones operativas

Las condiciones operativas son las mismas que en el apartado anterior. La simulación se realiza sobre el caso pérdida del 50% en el distribuidor y una velocidad de fluidización de dos veces la velocidad de mínima fluidización, empleando la formulación de Gidaspow por ser la más adecuada.

4.3.3 Mallado del dominio computacional

Las nuevas dimensiones del problema permiten un mayor número de nodos si se mantiene el tamaño de las celdas, lo cual afina mucho el proceso de cálculo y la veracidad de los resultados. Sin embargo, un aumento tan importante de las dimensiones conduce a una malla con un número de nodos mayor de 30.000 y se sabe que, para un número tan elevado, el tiempo de cálculo se multiplica, siendo algo inviable para la realización de un proyecto de esta magnitud. Por lo tanto, la malla escogida para este modelo posee el mismo número de nodos (11.664) pero las celdas aumentan su tamaño en un 35% frente a los casos previos. La comprobación del CFL sigue siendo válida para este caso (ecuación 30).

4.3.4 Descripción del caso

En este bloque se realiza la simulación del CASO 10 para la cual se emplea la formulación de Gidaspow por ser la que produce mejores resultados. El paso de tiempo empleado es de $5 \cdot 10^{-4}$ segundos. Se emplea una pérdida de carga en el distribuidor del 50% y la velocidad de entrada del aire se corresponde con la de 2 veces la velocidad de mínima fluidización.

De este modo, la características principales de esta simulación quedan resumidas en el siguiente cuadro (tabla 4.6):

CASO	Modelo de plénum	U/Umf	Pérdida de carga (%)	Formulación	Paso de tiempo (s)
10	B	2	50	Gidaspow	$5 \cdot 10^{-4}$

Tabla 4.6; Características principales del CASO 10

Los objetivos de este bloque se basan en comparar los resultados con los datos experimentales disponibles y a su vez añadir otros resultados que permitan caracterizar mejor el comportamiento del lecho fluido.

4.4 ESTRATEGIA DE INICIALIZACIÓN Y ARRANQUE

Para los casos simulados del primer bloque no fue necesaria ninguna estrategia de inicialización, únicamente se realizaba el arranque con un modelo de discretización de primer orden que se reemplazaba por el de segundo orden transcurridos los primeros 100 pasos de tiempo. Sin embargo, la incorporación del plénum supuso ciertos problemas en el arranque de los casos. El modelo de entrada de aire que más se ajusta a la realidad es el correspondiente al modelo de plénum B, sin embargo, este método creaba un efecto pistón que hacía imposible llevar a cabo la simulación (Fig. 4.10), es decir, el perfil de entrada de aire era tan uniforme que no se producía la aparición de ninguna burbuja y todas las partículas se veían arrastradas por la corriente de igual manera, llegando a salir por la superficie superior de la columna. Por este motivo se decidió combinar los dos modelos de la siguiente manera:

- Primer paso: Modelo A: se arranca la simulación con este modelo para provocar la aparición de las primeras burbujas y evitar el efecto pistón mencionado anteriormente.
- Segundo paso: Modelo B: transcurrido medio segundo aproximadamente ya hay una presencia de burbujas lo suficientemente elevada para realizar el cambio en las condiciones de contorno del modelo para realizar la entrada de aire por toda la superficie inferior del plénum.

Para que un cambio tan brusco no provocase inestabilidades que perjudicasen a la simulación se decidió emplear una velocidad de entrada mucho más alta de la que se pretende estudiar (de orden de 10 veces superior). El objetivo es eliminar los torbellinos existentes en el plénum por el empleo del modelo A que eran la razón principal de los problemas de divergencia. Una vez eliminadas las turbulencias se redujo progresivamente la velocidad de entrada hasta alcanzar la relación de velocidades, U/U_{mf} , deseada.

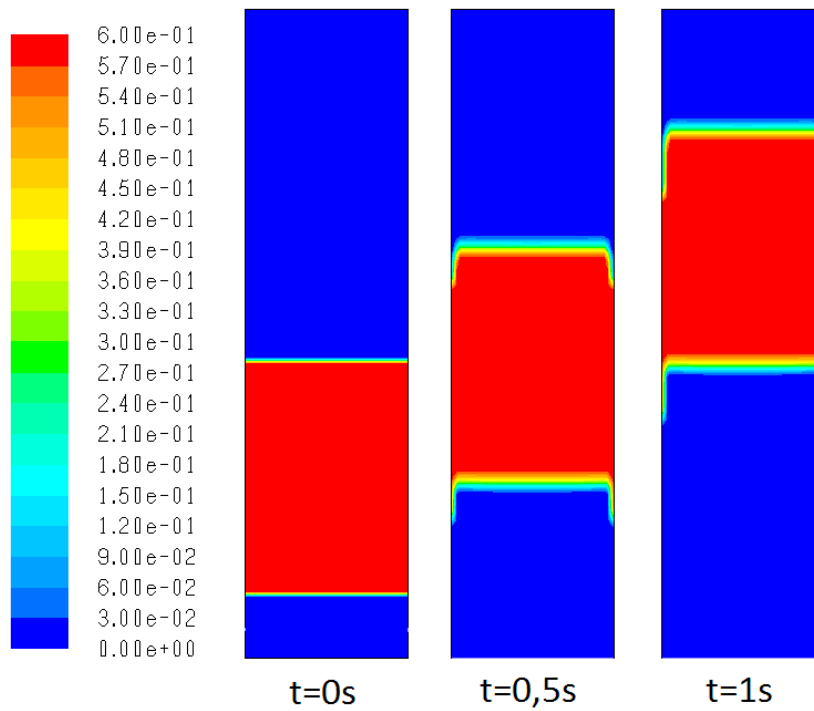


Figura 4.10: Efecto pistón al emplear el modelo de entrada B sin combinar

4.5 RESUMEN DE CASOS

En la siguiente tabla (Tabla 4.7) se muestran los casos simulados con una breve descripción que facilita su reconocimiento.

Bloque	Caso	Modelo de entrada de gas al lecho	Formulación	Caída de presión en el distribuidor	U/U_{mf}
1	1	Superficie inferior	Syamlal-O'Brien	-	1
	2	Superficie inferior	Syamlal-O'Brien	-	2
	3	Superficie inferior	Gidaspow	-	2
	4	Superficie inferior	Gidaspow	-	2
2	5	Modelo de plénum A: Entradas laterales	Gidaspow	0%	2
	6	Modelo de plénum B: Superficie inferior	Gidaspow	0%	2
	7	Modelo de plénum B: Superficie inferior	Gidaspow	50%	1,5
	8	Modelo de plénum B: Superficie inferior	Gidaspow	50%	2
	9	Modelo de plénum B: Superficie inferior	Gidaspow	50%	2,5
3	10	Modelo de plénum B: Superficie inferior	Gidaspow	50%	2

Tabla 4.7: Resumen de casos y características principales

5. RESULTADOS

5.1 REPRODUCCIÓN Y COMPARACIÓN DE UN ESTUDIO COMPUTACIONAL SOBRE UN LECHO FLUIDIZADO

El siguiente cuadro resume los casos pertenecientes a este bloque de resultados (tabla 5.1). se incluye también el tiempo de computación necesario para cada uno de los casos.

Caso	Modelo de malla	Paso de tiempo (s)	Formulación	U (m/s)	Tiempo de computación (horas)	Tiempo real de simulación (s)
1	1	0,001	Syamlal-O'Brien	0,38	43	3,42
2	1	0,0005	Syamlal-O'Brien	0,38	80	3,12
3	1	0,001	Gidaspow	0,38	35	4,21
4	1	0,001	Gidaspow	0,19	32	3,58

Tabla 5.1: Resumen de casos bloque 1. Tiempo de computación

Se han encontrado algunas diferencias entre los resultados obtenidos en las simulaciones llevadas a cabo en este proyecto y los resultados publicados en el artículo de la U.B.C. aun habiendo utilizado los mismos modelos de simulación. Con el fin de buscar una explicación, a lo largo de este documento se va a comparar los perfiles de presión, velocidad y fracción volumétrica de cada una de las fases entre cada uno de los modelos empleados con la solución propuesta por el artículo publicado.

5.1.1 Perfiles de fracción volumétrica de fase sólida

En primer lugar compararemos los perfiles de fracción de volumen de fase sólida de la simulación obtenidos en el artículo. La siguiente figura (Fig. 5.1) muestra la evolución de la fase sólida a lo largo del tiempo desde un instante de reposo inicial hasta que transcurren 3 segundos en intervalos de 0,5 segundos de tiempo. A la

izquierda de las imágenes se indica el valor de fracción volumétrica (desde 0 hasta 0,6) correspondiente a cada color representado.

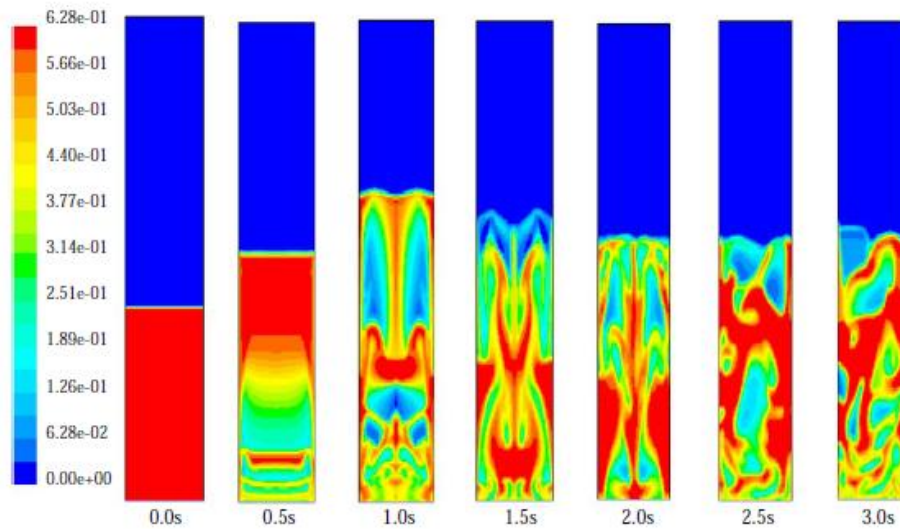


Figura 5.1: Resultados obtenidos en U.B.C. (Modelo: Syamlal-O'Brien; $U=0,38\text{m/s}$; $e_{ss}=0,9$)

Si nos fijamos en el desarrollo inicial del lecho fluido podemos observar cómo se mantiene la simetría más allá de los 2 segundos, momento en el cual empieza a convertirse en un lecho burbujeante, aunque es necesario que pasen tres segundos para ver una formación de burbujas más regular. Al principio el lecho se expande hasta su máximo grado, llegando a una altura de 64 cm aproximadamente, pero al comenzar a burbujear desciende de nuevo la altura de la fase sólida para alcanzar la altura del lecho en fluidización. Las burbujas no están definidas debido en parte a que se empleó un método de discretización de primer orden.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la simulación de los casos 1, 2 y 3. Estos resultados servirán para evaluar la influencia del modelo de ecuaciones empleado (Syamlal-O'Brien o Gidaspow). La figura 5.2 corresponde con el perfil de fracción volumétrica del Caso 1 (modelo de ecuaciones de Syamlal-O'Brien) y la figura 5.3 pertenece al modelo de ecuaciones de Gidaspow (Caso 3) para una velocidad de entrada del aire de $0,38\text{ m/s}$ y un paso de tiempo de 10^{-3} s . Además, para ver la influencia del paso de tiempo sobre la simulación, en la figura 5 se representa el resultado correspondiente con el modelo de ecuaciones de Syamlal-O'Brien y velocidad del aire de entrada de $0,38\text{ m/s}$ pero para un paso de tiempo de $5 \cdot 10^{-4}\text{ s}$ que corresponde con el Caso 2.

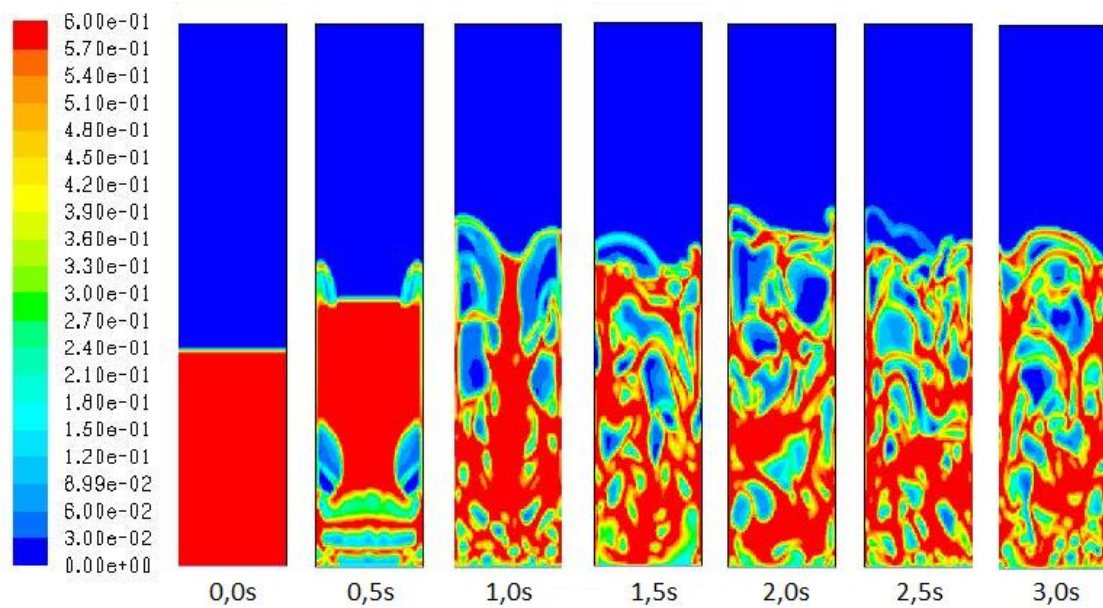


Figura 5.2: Caso 1; Formulación: Syamlal-O'Brien; $U=0,38\text{m/s}$; $e_{ss}=0,9$; paso de tiempo= $0,001\text{s}$

Se observa como existen diferencias prácticamente desde el principio ya que cuando ha transcurrido medio segundo aparecen unas burbujas de aire en las paredes laterales del depósito. Por otra parte, la simetría del caso se rompe poco después y con apenas un segundo transcurrido ya se observa un estado burbujeante. La altura del lecho es mayor que en la simulación de partida realizada por la U.B.C.

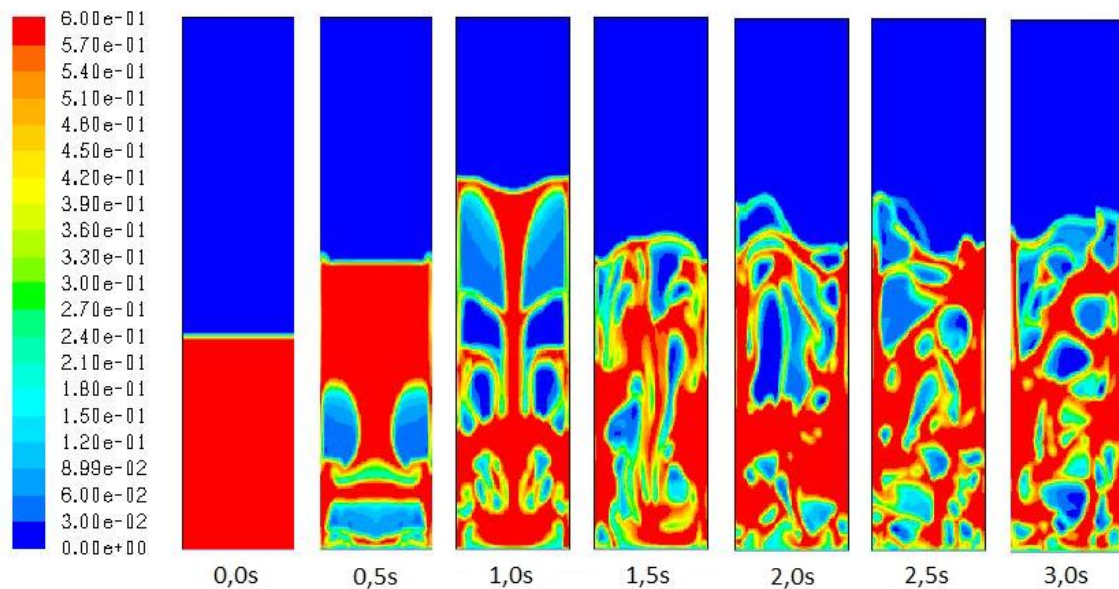


Figura 5.3: Caso 3; Formulación: Gidaspow; $U=0,38\text{m/s}$; $e_{ss}=0,9$; paso de tiempo= $0,001\text{s}$

Con el modelo de cálculo de Gydaspow se mantiene durante más tiempo la simetría. Sin embargo, pronto aparecen las burbujas y no se llega a conseguir la evolución del lecho que obtuvieron en U.B.C. en la fase inicial, pues ahora también se llega a un estado de burbujeo antes de los tres segundos

Para el siguiente caso se ha optado por reducir el paso de tiempo a 0,0005 segundos para ver la influencia que tiene en los resultados. Se vuelve a utilizar el modelo de Syamlal-O'Brien con una velocidad de entrada de 0,38m/s y un coeficiente de restitución de 0,9.

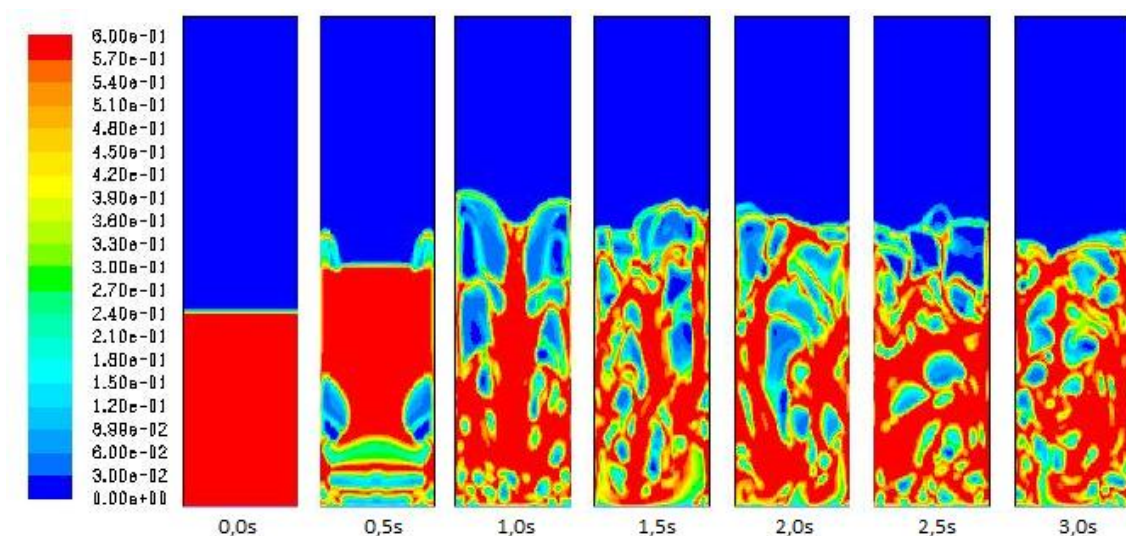


Figura 5.4: Caso 2; Formulación: Syamlal-O'Brien; $U=0,38\text{m/s}$; $e_{ss}=0,9$; paso de tiempo=0,0005s

Podemos ver como al reducir el paso de tiempo apenas hay diferencias; pronto se rompe la simetría y comienzan a desarrollarse las burbujas. Sin embargo, en esta ocasión se observa que la altura que alcanza la fase sólida en los primeros compases es menor y, por tanto, más próxima a la de la simulación del artículo.

5.1.2 Grado de expansión del lecho fluido

Para poder conocer mejor el comportamiento de los lecho fluidizados en esta fase inicial, se han extraído gráficos que muestran el grado de expansión del lecho fluido comparado con el estado de reposo (H_0) en función de la velocidad de inyección del aire (U). A continuación se incluye la curva de expansión del lecho publicada por la B.C.U. (Fig. 5.5).

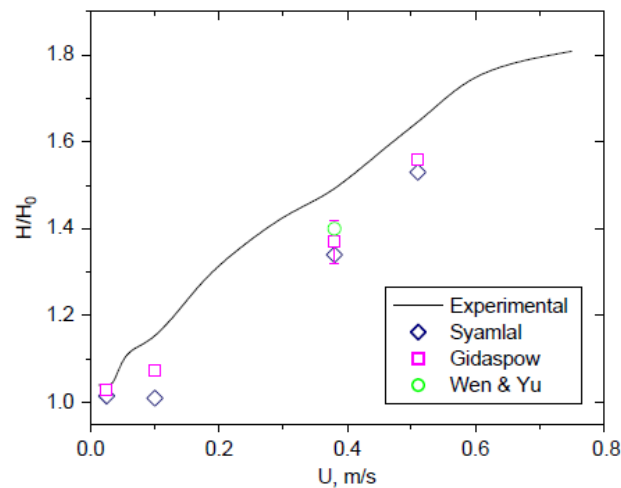


Figura 5.5: Comparación realizada por B.C.U. del grado de expansión del lecho fluido según la velocidad de inyección de gas para distintos modelos de cálculo con respecto al experimento ($e_{ss} = 0,9$)

Dado que en el estudio realizado por la U.B.C. no se especifica el criterio utilizado para determinar cuál es el punto donde se puede considerar despreciable la presencia de partículas sólidas se ha utilizado dos criterios para comprobar cuál se asemeja más a los resultados mostrados en el artículo. A modo ilustrativo se muestra el procedimiento para obtener los valores que nos interesan en uno de los casos simulados.

El programa de simulación FLUENT permite obtener el perfil de fracción de sólidos en función de la distancia al fondo del depósito. La figura 5.6 muestra el perfil obtenido para uno de los casos simulados. Trazando una línea de tendencia (línea roja) se puede conocer cuál es la fracción volumétrica de sólidos en el punto que se desee. En este caso se ha extraído dos puntos que corresponden con el 50% (línea azul) y 90% (línea verde) del valor máximo.

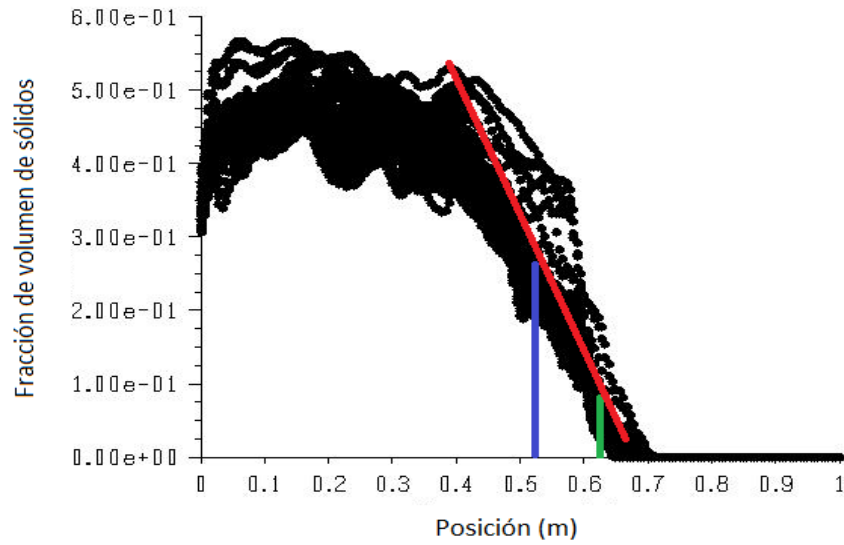


Figura 5.6: Fracción volumétrica de fase sólida (Caso 1; Formulación: Syamlal-O'Brien; $U=0,38$)

Así pues, se pueden elaborar un gráfico empleando el criterio del 90% (Fig. 5.7) y otro con el criterio del 50% (Fig. 5.8) para comparar y obtener el modelo más parecido al empleado en el artículo publicado por la U.B.C.

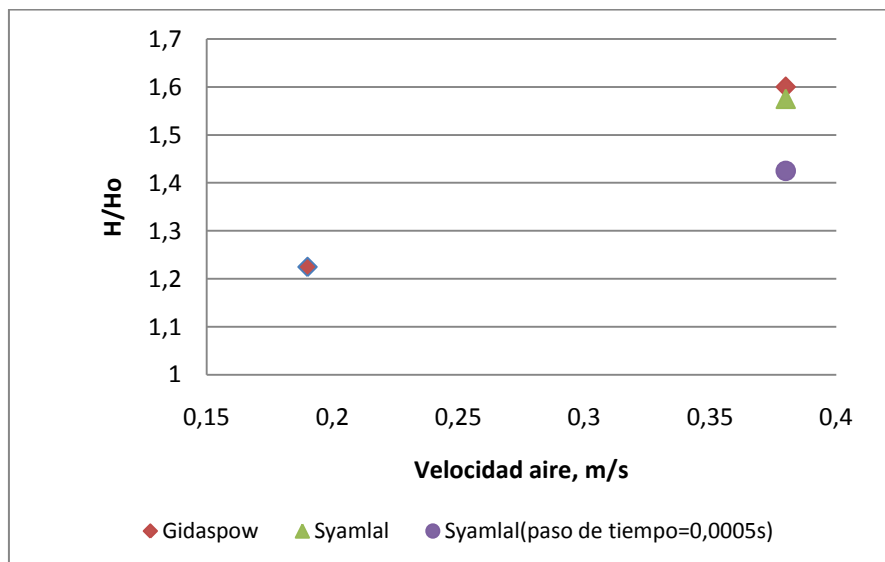


Figura 5.7: Grado de expansión del lecho utilizando el criterio del 90%

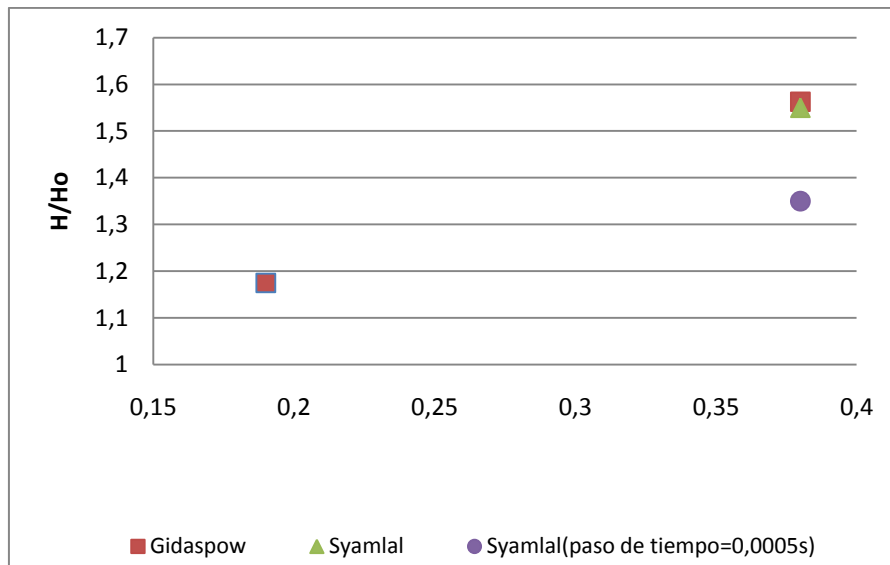


Figura 5.8: Grado de expansión del lecho utilizando el criterio del 50%

Atendiendo a estos resultados cabe pensar que probablemente se siguió un criterio cercano al de tomar el 50% de la pendiente para obtener el nivel de expansión del lecho ya que resultan más próximos los valores para este criterio que para el del 90%. Por otro lado, se observa que el nivel de expansión del lecho obtenido en las simulaciones de los casos 1 y 3 resulta ser mayor que en el caso del artículo y es el Caso 2 el que obtiene unos valores más parecidos a los del artículo (recordemos que en ese caso el paso de tiempo se redujo a $5 \cdot 10^{-4}$ segundos).

5.1.3 Caída de presión en la columna del lecho

A continuación se representa la caída de presión entre la base de la columna del lecho fluido y la superficie libre de fase sólida en función del tiempo. Comparando los resultados se observa que hay aproximadamente 1 kPa de diferencia en la pérdida de presión entre lo obtenido por la U.B.C. (Fig. 5.9) y los resultados obtenidos en este proyecto (Fig. 5.10).

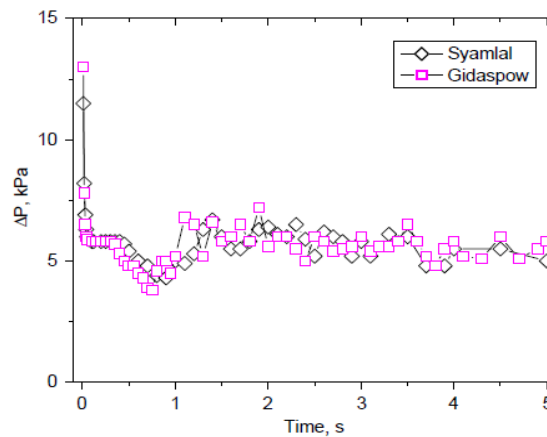


Figura 5.9: Comparación realizada por B.C.U. de la caída de presión en el lecho simulado usando los modelos de Syamlal-O'Brien y Gidaspow para el caso central del estudio (velocidad de fluidización = 0,38 m/s; $e_{ss} = 0,9$)

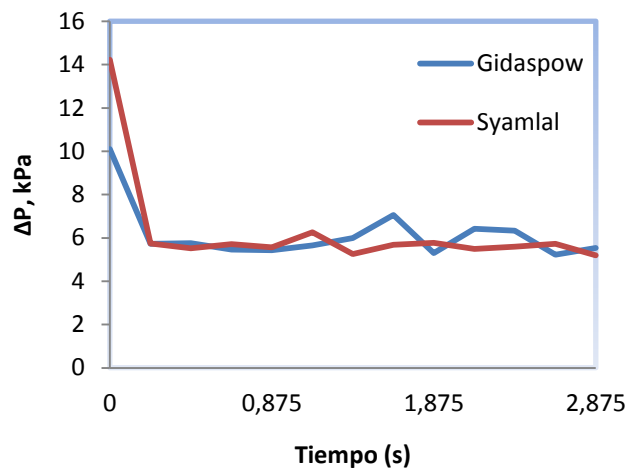


Figura 5.10: Comparación de la caída de presión en el lecho simulado usando los modelos de Syamlal-O'Brien (Caso 1) y Gidaspow (Caso 3). Velocidad de fluidización = 0,38 m/s; $e_{ss} = 0,9$.

5.1.4 Aparición de burbujas de aire

Otro aspecto para comparar es la presencia de burbujas de aire sobre la superficie del lecho. Para ello, se han tomado los valores estadísticos sobre una línea de control situada a una altura de 0,2 metros sobre la superficie inferior. Para conocer en qué lugares hay mayor presencia de burbujas de aire basta con obtener la fracción

de volumen de éste a lo largo de la línea de control. En aquellos lugares donde tenga mayor valor será un indicativo de los lugares en los que hay mayor tránsito de burbujas. En primer lugar se muestran los resultados publicados por la U.B.C. (Fig. 5.11), en el que la velocidad de entrada de aire es de 0,46m/s, y a continuación los obtenidos en el Caso 1, en el que se utiliza la formulación de Syamlal-O'Brien con una velocidad de entrada de aire de 0,38m/s y paso de tiempo de 10^{-3} s (Fig. 5.12).

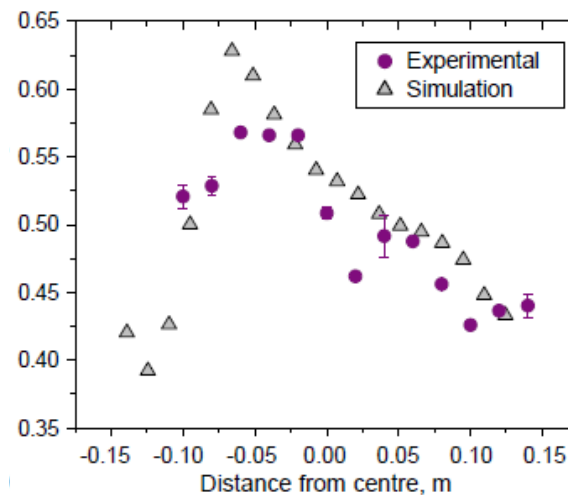


Figura 5.11: Fracción volumétrica de aire en la simulación realizada por la U.B.C. ($z=0,2$ m; $U=0,46$ m/s)

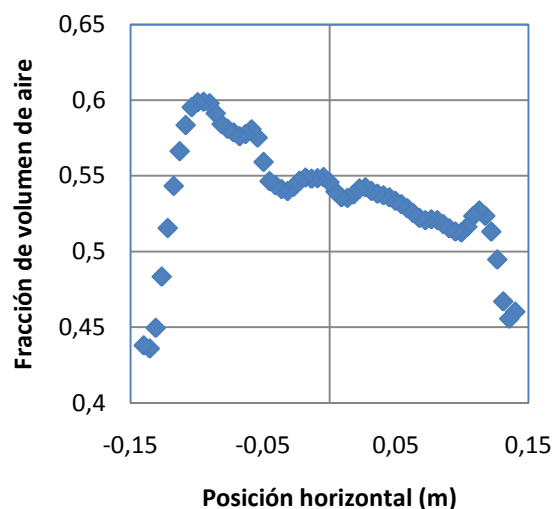


Figura 5.12: Fracción volumétrica de aire (Caso 1; Formulación: Syamlal-O'Brien; $z=0,2$ m; $U=0,38$ m/s; $e_{ss}=0,9$; paso de tiempo= $0,001$ s)

Se aprecia cierta semejanza entre ambos perfiles ya que, en primer lugar, cerca de las paredes de la columna la presencia de burbujas es menor y, por otro lado, la distribución no es uniforme sino que hay mayor tránsito de burbujas por un lado del depósito que por otro. Esto es posiblemente debido a que el tiempo de iteración no fue lo suficientemente extenso para que se alcanzara una solución simétrica desde un punto de vista estadístico pues los datos se obtuvieron para los tres primeros segundos de iteración.

5.1.5 Velocidad de las partículas sólidas

Desde el punto de vista de las aplicaciones industriales, resulta de especial interés conocer la velocidad que alcanzan las partículas sólidas como consecuencia del arrastre que sufren por parte del flujo de aire. Existe una solución analítica para conocer la velocidad de las partículas basada en la teoría cinética de los fluidos mixtos de partículas elásticas (Huilin et al., 2003). Al expresarla en coordenadas cilíndricas resulta:

$$v_s = v_{s,m\acute{a}x} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (34)$$

donde r y R son la distancia desde el centro del lecho y el tamaño de éste respectivamente. Esta ecuación es muy aproximada y proviene de un modelo de emulsión aire-partículas que circula en un tubo. No considera los modelos de lecho fluido pero se adoptará la ecuación como medida de comparación con una solución analítica.

A continuación se muestra el resultado obtenido en U.B.C. (Fig. 5.13). En este caso, se utilizó una velocidad de entrada de 0,46 m/s. En el siguiente gráfico (Fig. 5.14) se refleja lo obtenido en la simulación del Caso 1, en el que velocidad del gas de entrada de 0,38m/s. En ambos casos se ha evaluado la media temporal de la velocidad de las partículas sobre una línea de control situada a 0,2m del fondo de la columna de lecho.

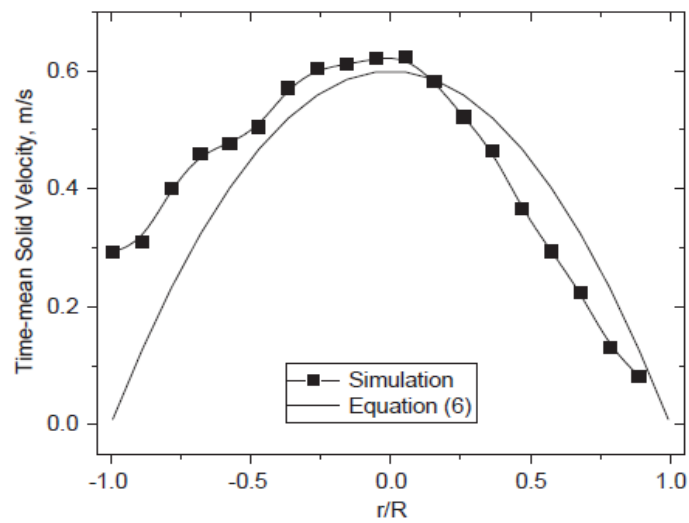


Figura 5.13: Velocidad vertical de las partículas sólidas frente a la teórica (resultados por la U.B.C.); $U=0,46\text{m/s}$

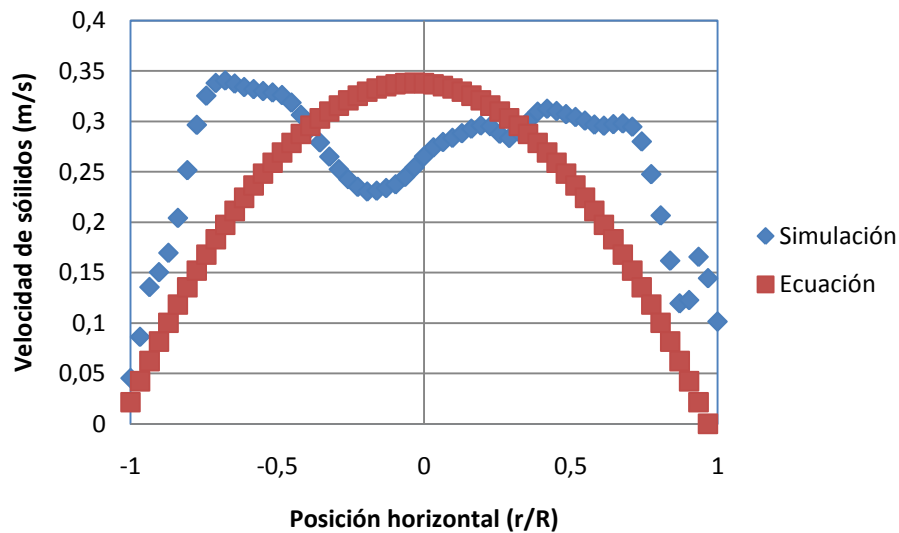


Figura 5.14: Velocidad vertical de las partículas sólidas frente a la teórica (resultados por el presente estudio para el Caso 1); $U=0,38\text{m/s}$

Como en el caso de la presencia de burbujas, aquí ambos casos coinciden en una menor velocidad de las partículas según nos acercamos a los límites de depósito debido al rozamiento entre sus superficies. Sin embargo, la velocidad máxima en la simulación no se da en la zona central, es decir, no se observa simetría.

5.1.6 Tránsito de burbujas de aire sobre un punto de control

Se han extraído datos sobre el flujo de burbujas de aire a su paso por un punto de control situado a una altura de 0,2m del fondo del depósito y centrado en el mismo. Esta vez se ha permitido que transcurra el suficiente tiempo para que la situación sea lo más estable posible pero sin incurrir en largos periodos de iteración. A continuación se incluyen los resultados experimentales y de simulación obtenidos en la U.B.C. (Fig. 5.15 y Fig. 5.16) así como los obtenidos en el proyecto (Fig.5.17) para el Caso 1.

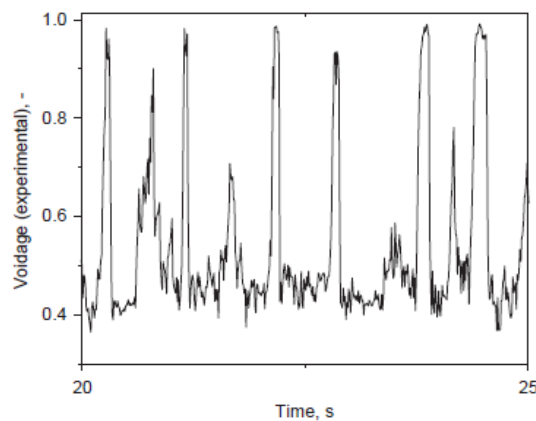


Figura 5.15: Tránsito de burbujas de aire obtenido por la U.B.C. en el caso experimental ($z=0,2\text{m}$)

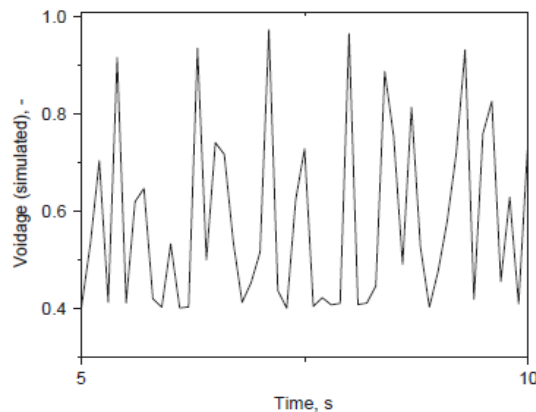


Figura 5.16: Tránsito de burbujas de aire obtenido por la U.B.C. en el caso simulado ($z=0,2\text{m}$)

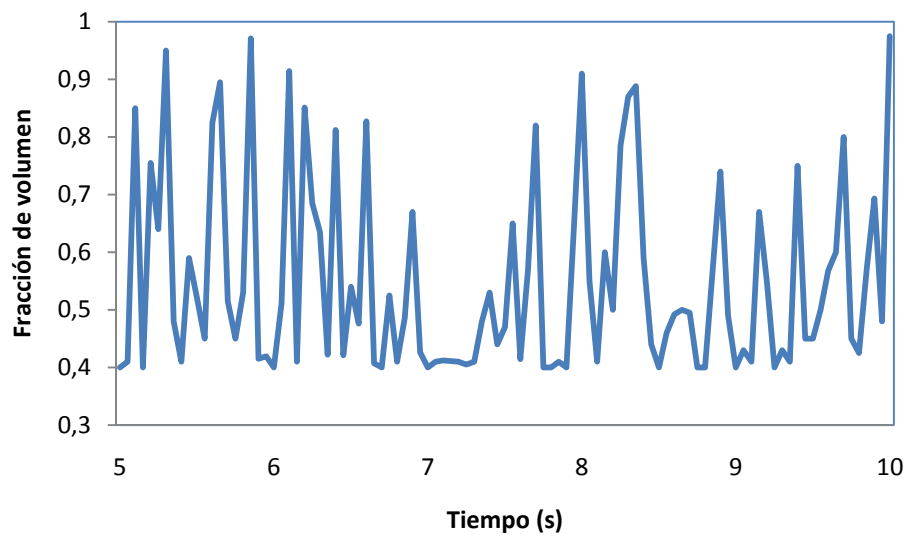


Figura 5.17: Tránsito de burbuja de aire (Caso 1; $z=0,2\text{m}$)

Cada uno de los picos que aparecen se corresponde con el paso de una burbuja de aire por el punto de control. El comportamiento es similar en todos los casos y como media, todos presentan una fracción volumétrica próxima a 0,4 cuando no existe ninguna burbuja cerca. Sin embargo, en nuestra simulación existe un mayor número de burbujas ascendiendo por el lecho, lo que se traduce en una mayor cantidad de valores pico en el gráfico (Fig. 5.17).

5.2 EFECTO DE LA INCLUSION DEL PLÉNUM

En este apartado se incluyen los resultados obtenidos al incorporar el distribuidor y el plénium al modelo del primer bloque. Se evalúan los resultados obtenidos según el modelo de entrada, la caída de presión producida por el distribuidor de aire y la relación de velocidad U/U_{mf} . La siguiente tabla muestra un resumen de los casos así como de sus características generales y tiempo de computación requerido (tabla 5.2).

Caso	Modelo de plénium	Paso de tiempo (s)	Formulación	U/U_{mf} []	Caída de presión (%)	Tiempo de computación (horas)	Tiempo real de simulación (s)
5	A	0,0005	Gidaspow	2	0	60	5,67
6	B	0,0005	Gidaspow	2	0	53	8,44
7	B	0,0005	Gidaspow	1,5	50	78	12,03
8	B	0,0005	Gidaspow	2	50	84	10,23
9	B	0,0005	Gidaspow	2,5	50	105	7,65

Tabla 5.2: Resumen de casos bloque 2. Tiempo de computación

5.2.1 Modelos de plénium

En primer lugar se ha determinar cuál es el mejor método a la hora de simular un plénium real. En este documento se emplearon dos modelos (Modelo A y Modelo B) que pueden marcar una línea de trabajo para futuras investigaciones. Por tanto, los casos tratados en este apartado son el CASO 5 y el CASO 6 (apartado 4.2).

Con el fin de conocer el comportamiento del lecho ante estos modelos de entrada se analiza el perfil de velocidad del aire sobre la superficie del distribuidor, el tránsito de burbujas sobre un punto del lecho, la fracción de volumen sobre una superficie situada en el lecho y los perfiles de velocidad de las partículas sólidas.

5.2.1.1 Velocidad del aire sobre el distribuidor

El objetivo de emplear un plénum y su correspondiente distribuidor es homogeneizar la entrada de aire al lecho. El perfil ideal al cual se pretende llegar es el equivalente al perfil teórico (uniforme y constante a lo largo de la superficie). Una situación así es prácticamente imposible de conseguir, pero se ha de procurar encontrar la manera de aproximarse el mayor grado posible a una solución de este tipo. Para evaluar los modelos de entrada simulados (CASO 5 y CASO 6) se representa a continuación el perfil estadístico de velocidad de entrada del aire al lecho a través del distribuidor (Fig. 5.18):

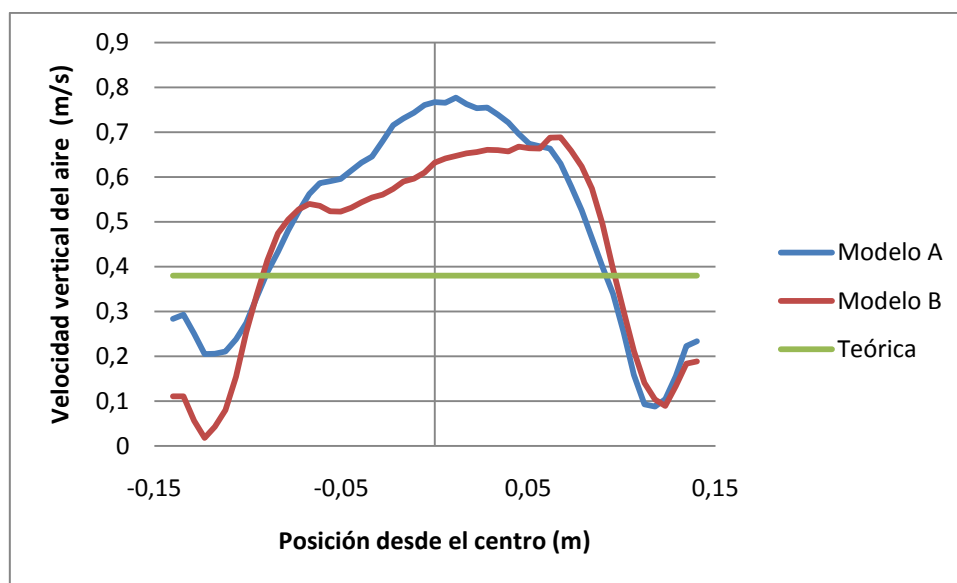


Figura 5.18: Velocidad vertical del aire sobre el distribuidor ($z=0$); Modelos A y B Frente a curva teórica

Como era de esperar, el perfil de velocidad vertical de aire sobre la superficie superior del distribuidor del modelo de entrada B está más cerca del perfil teórico (uniforme en toda la superficie) que el perfil del modelo A debido a que en el modelo B el aire entra uniformemente por la superficie inferior del plénum, atravesando este elemento sin sufrir grandes variaciones en la corriente hasta llegar al distribuidor; sin embargo, en el modelo A el flujo dentro del lecho es muy turbulento e irregular, dando lugar a la no uniformidad del perfil de entrada de aire al lecho. El vértice que se aprecia en la zona central del lecho en el modelo A es debido a la colisión de las dos corrientes de aire provenientes de las entradas laterales del plénum (Fig. 5.23).

5.2.1.2 Tránsito de burbujas

En este apartado se analiza tránsito de burbujas a través de un punto de control situado a una altura de 20 cm sobre el distribuidor y centrado sobre en el lecho. El objetivo es conocer qué modelo produce un mayor burbujeo así como el tamaño de las burbujas. Para ello se extrae el siguiente gráfico (Fig. 5.19) que representa frente al tiempo la fracción de volumen de aire que hay sobre el punto de control. El valor mínimo encontrado (0,4) corresponde con el estado de máximo empaquetamiento de la fase densa (0,6). En estas zonas la presencia de aire está limitada al espacio libre que existe entre las partículas esféricas. Por el contrario, los picos existentes corresponden con una fracción de volumen de aire muy elevada, siendo por tanto el instante en que pasa una burbuja de aire por el punto de control.

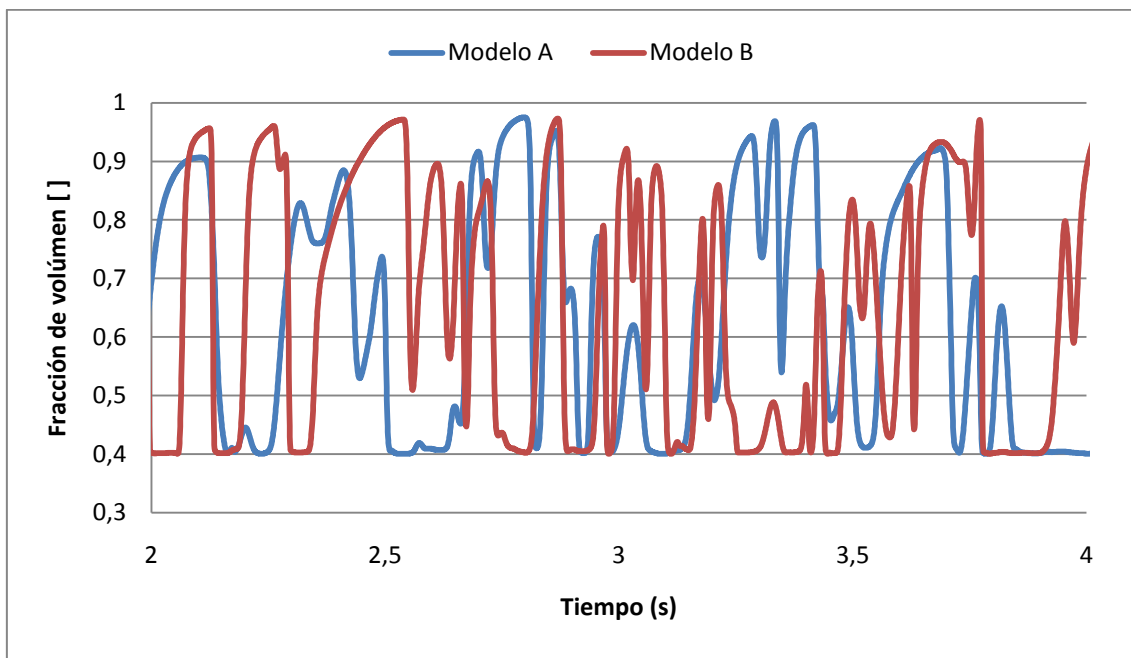


Figura 5.19: Fracción volumétrica de aire sobre punto control ($z=20\text{cm}$); Modelos A y B

A la vista de los resultados, la señal del Modelo A (4.2.) se muestra algo más uniforme que la del Modelo B (4.2.), sin variaciones tan bruscas. Esto indica que las burbujas de aire son de mayor tamaño, y por tanto, que el número total de éstas en el lecho es menor, debido a que la velocidad superficial generada en el centro del lecho en el caso del modelo A es mayor debido a las características de este modelo. Además, este fenómeno puede provoca que la fracción volumétrica de aire en la línea vertical central del lecho sea muy grande.

5.2.1.3 Fracción de volumen de aire

Los lechos fluidizados no se comportan de igual forma en toda su superficie. Esto se traduce en una asimetría en la presencia de burbujas de aire sobre la superficie del lecho, debida a un reparto no uniforme del gas de entrada. Si analizamos la fracción volumétrica de aire que existe sobre una línea de control situada a 20 cm del distribuidor y que abarca el ancho de la columna del lecho podemos ver cómo, aunque estadísticamente debería ser un perfil simétrico, al contar con un número finito de datos, el flujo de aire es mayor en un lado que en el otro (Fig. 5.20).

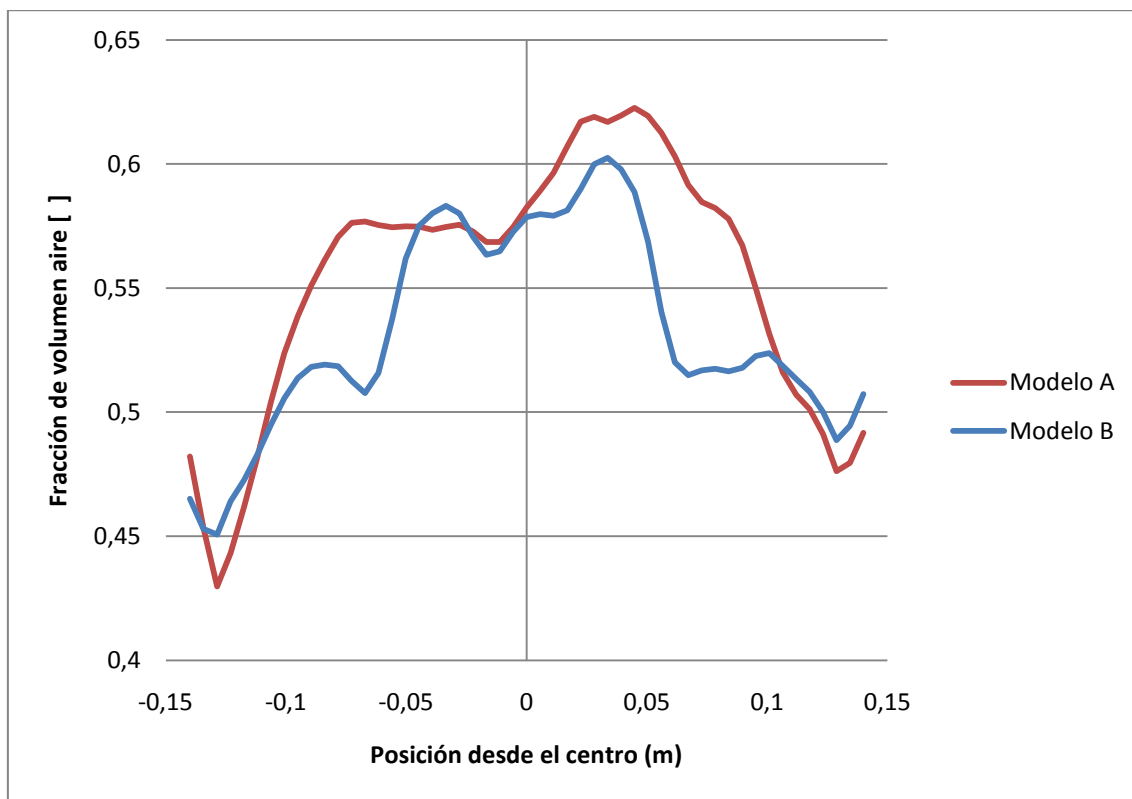


Figura 5.20: Fracción volumétrica de aire ($z=20\text{cm}$); Modelos A y B

Como era de esperar, los resultados muestran la asimetría del lecho. Aun así, se aprecia un comportamiento más simétrico en la simulación del modelo B (CASO 6) que en la del modelo A (CASO 5) aun a pesar de contar con el mismo rango de tiempo de simulación. Sin duda, la introducción del aire desde la superficie inferior produce un lecho más uniforme y simétrico.

5.2.1.4 Velocidad de las partículas sólidas

Un factor muy importante a analizar del comportamiento de los lechos fluidos viene dado por las aplicaciones industriales; se trata de la velocidad de las partículas sólidas. Es interesante conocer este parámetro ya que de él depende en gran medida el grado de interacción entre fases, algo decisivo en procesos tales como el secado por fluidización (apartado 1.4.4).

A continuación se incluye el perfil de velocidad media de las partículas en las dos direcciones a lo largo de una línea de control situada a 20 cm del fondo de la columna de lecho. Se indica además cual sería la curva de velocidad vertical teórica hallada mediante la ecuación 34, ver figura 5.21. También resulta interesante conocer la componente horizontal de la velocidad de los sólidos (Fig. 5.22).

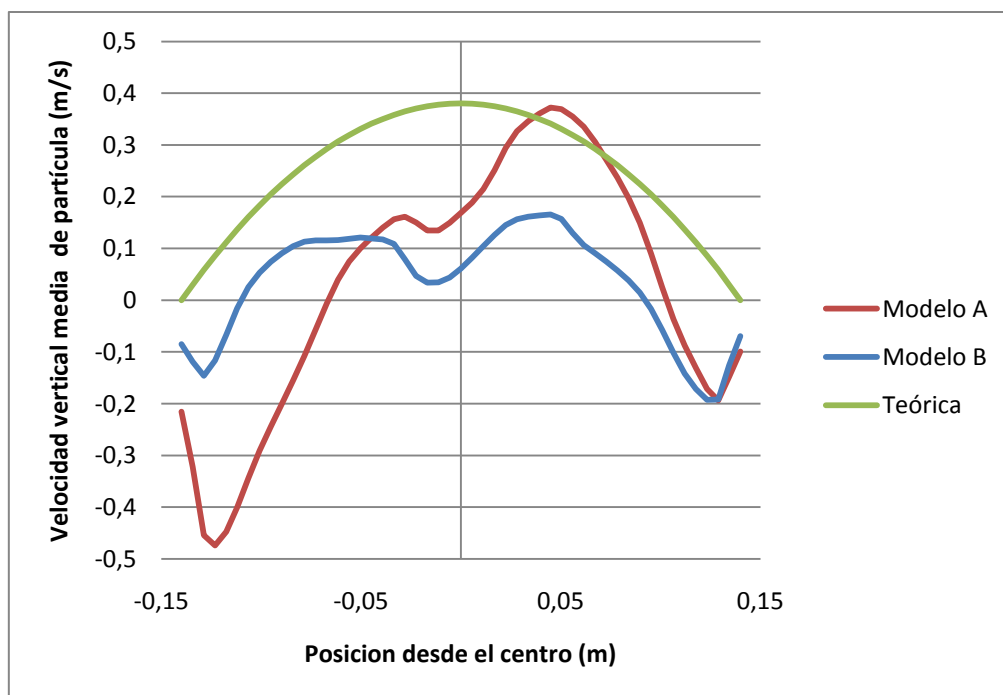


Figura 5.21: Velocidad vertical de las partículas sólidas ($z=20\text{cm}$); Modelos A y B

De nuevo, y relacionado con los resultados del apartado anterior, aparece un perfil asimétrico con valores más altos en la mitad derecha del lecho. Esto es debido a que las partículas sólidas se ven arrastradas por el aire en su ascensión, por lo tanto, allí donde mayor es la velocidad vertical del aire mayor es el arrastre de partículas. Por este motivo, el perfil correspondiente al modelo A posee un rango de valores muy

superior en la mitad derecha que en la mitad izquierda del lecho. El modelo B vuelve a mostrarse más equilibrado y simétrico, aproximándose su curva a la curva teórica

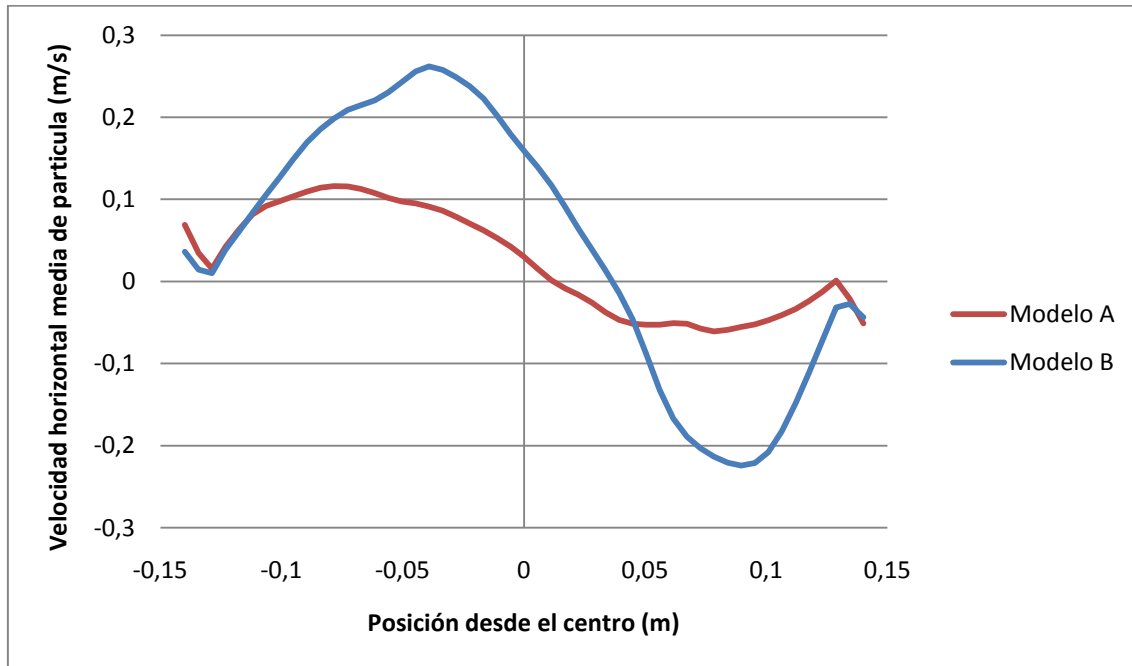


Figura 5.22: Velocidad horizontal de las partículas sólidas ($z=20\text{cm}$); Modelos A y B

La velocidad horizontal de las partículas sólidas del lecho es muestra del grado de agitación del mismo. Resulta curioso como el modelo que se presenta como más estable y que produce una fluidización más uniforme (modelo B) es también el que posee mayor velocidad horizontal de sus partículas en valor absoluto. Sin duda los resultados se ven muy influenciados por la ausencia de datos necesarios para realizar un perfil estadístico de mayor precisión.

5.2.1.5 Vectores velocidad del aire en el modelo de plénum A

Con el fin de ilustrar el fenómeno causante de la inestabilidad de la simulación del CASO 5 se incluye a continuación el perfil de vectores de velocidad del aire, ampliado sobre la superficie del plénum. Puede observarse la aparición de torbellinos de gran violencia fruto de la colisión directa de las dos corrientes de entrada. Como ya se explicó en el apartado 4.4, un plénum real no produciría un flujo tan virulento debido a la relajación del mismo a través de la tercera dimensión que no es posible incluir en la simulación numérica.

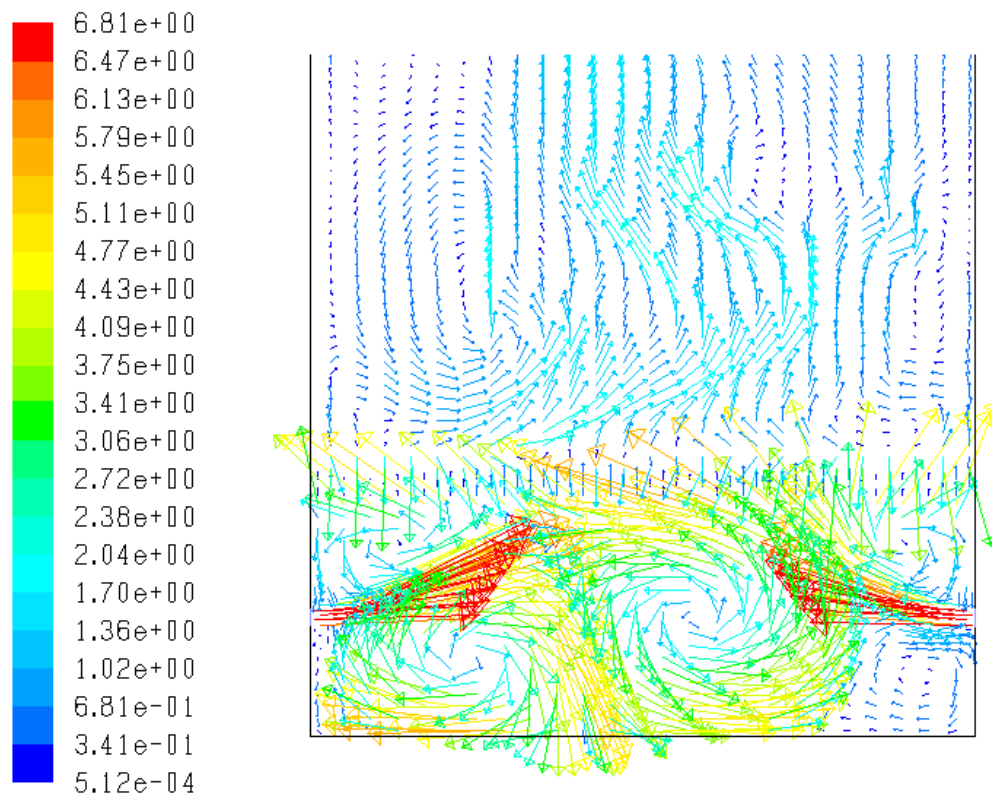


Figura 5.23: Vectores de velocidad del aire ($2 \cdot U/U_{mf}$); Modelo A

5.2.2 Caracterización del distribuidor de aire

Los resultados obtenidos en el apartado anterior hicieron decantarse por el empleo del modelo B como el más adecuado ya que proporciona un perfil de aire más uniforme y reproduce mejor las condiciones operativas reales. El objetivo de este apartado es conocer las condiciones operativas de los distribuidores de aire y la metodología que debe emplearse para modelar estos dispositivos. Se va a estudiar el mismo caso sin tener en cuenta ninguna pérdida de presión y con una pérdida de presión del 50% de la presión estática existente en el fondo debida a la columna de lecho que se encuentra sobre él.

5.2.2.1 Caída de presión del lecho

A continuación se muestra el salto de presión que tiene lugar en el distribuidor, situado en el origen de coordenadas (Fig. 5.24). La curva representa la presión estática que hay en el lecho a lo largo de una línea de control vertical situada en el centro de la columna 2D del lecho.

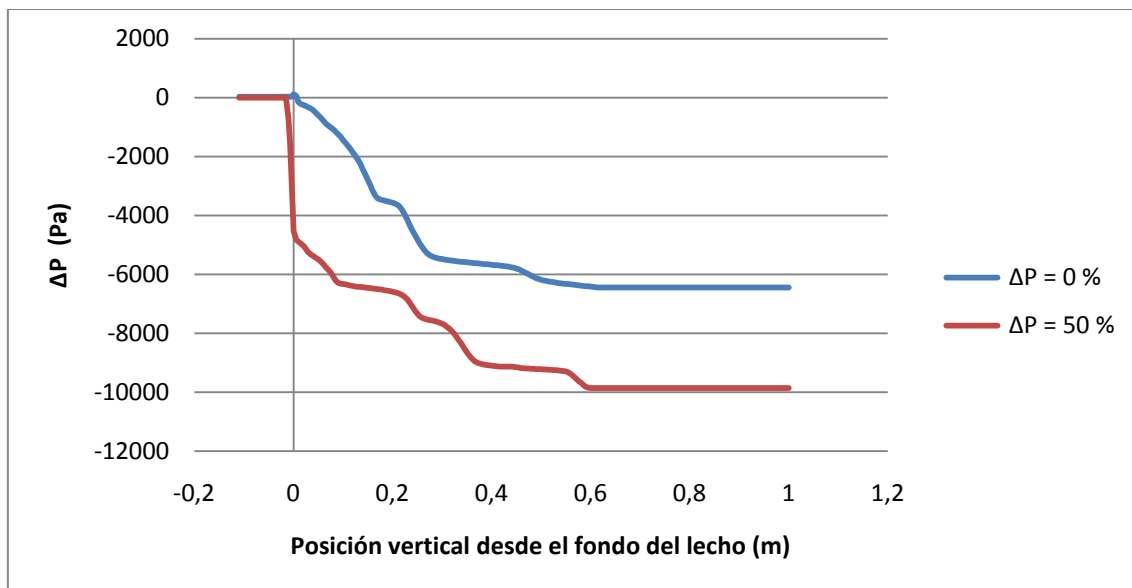


Figura 5.24: Caída de presión en el distribuidor; CASOS 6 y 8

Como se puede observar, la caída de presión existente en el caso en que no se programa la caída de presión del 50% a través del distribuidor (CASO 6) es nula. Si

miramos ahora la curva del caso en que se programa la caída de presión, vemos como el perfil muestra un salto en la presión de aproximadamente 4800 Pascales en el paso por el distribuidor. La curva de presión decrece a medida que se asciende por el lecho y es constante en la superficie libre de partículas sólidas, también conocida como freeboard.

Los cálculos iniciales para determinar los coeficientes necesarios para introducir en las condiciones de contorno del código del programa han resultado no ser los óptimos pues se debería obtener una caída de presión de 2943 Pa, que es el mitad de lo obtenido realmente. Posiblemente, la causa de este desajuste provenga de un problema asociado a la forma en el código FLUENT tiene impuestas las ecuaciones en medios porosos y su acople con medios no porosos.

5.2.2.2 Fracción de volumen de fase sólida

Con el fin de observar el estado de fluidización del lecho se representa el perfil de fracción de volumen de sólidos mediante el cual se puede apreciar claramente el tamaño y forma de las burbujas de aire (Fig. 5.25).

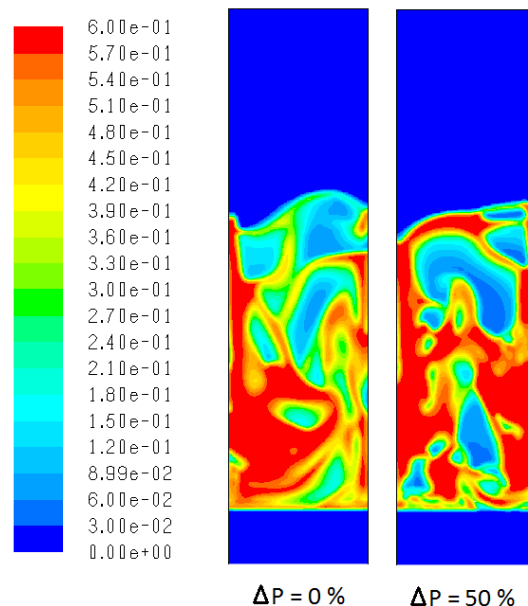


Figura 5.25: Fracción volumétrica de sólidos para los modelos de simulación 6 y 8

Pese a ser una captura instantánea y por tanto no representativa de todo el rango de tiempo simulado, el lecho para el caso sin pérdida de presión es más turbulento que si se añade la pérdida de carga; las burbujas no están tan bien definidas y su forma es muy irregular.

5.2.2.3 Velocidad del aire sobre el distribuidor

Todo parece indicar que cuando no se tiene en cuenta la pérdida de carga a la hora de realizar las simulaciones con plénum y distribuidor el lecho está más agitado. En este punto se analiza la velocidad estadística del aire a la salida del distribuidor para de este modo conocer la uniformidad o no de la misma conseguida (Fig. 5.26).

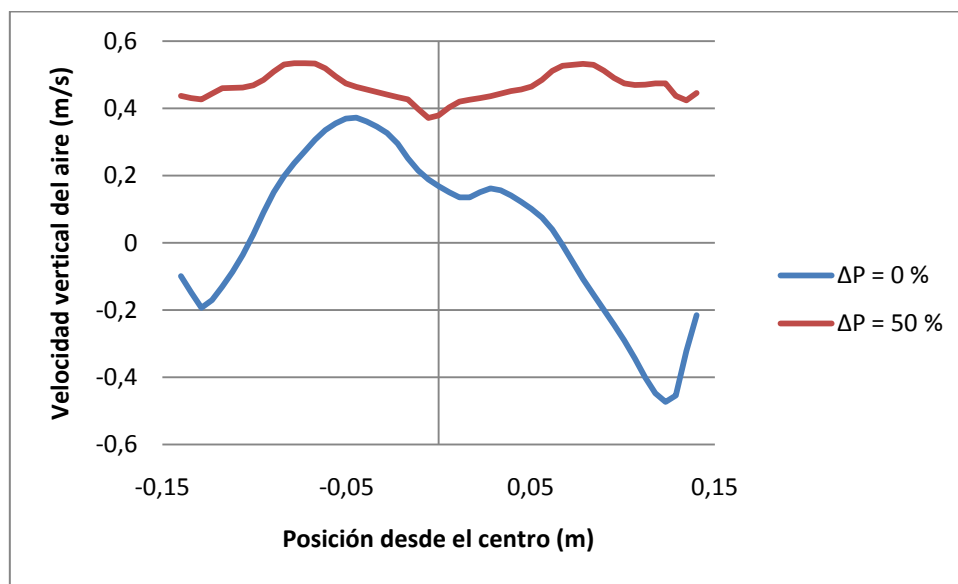


Figura 5.26: Velocidad vertical del aire sobre el distribuidor según la pérdida de carga; CASOS 6 y 8

Al programar el salto de presión en el distribuidor, el lecho se hace más uniforme, lo cual se refleja sobre el perfil de velocidad de entrada del aire al lecho. La explicación de esto es que si no se considera la realidad física de un distribuidor con su respectiva pérdida de carga, el flujo de aire de entrada no tiene ningún medio de relajación, creándose grandes turbulencias y efectos de resonancia en el plénum, lo que da lugar a un perfil tan variable que incluso tiene valores negativos de velocidad, es decir, parte del aire vuelve a entrar al plénum. Estos resultados avalan la teoría de

Daizo Kunii sobre la necesidad de una caída de presión en el distribuidor para asegurar la buena distribución del aire.

Cuando se da este fenómeno la simulación se vuelve muy inestable y aparecen numerosos problemas de divergencia de las ecuaciones. Este es el motivo de que no se puedan analizar los espectros de potencia para la señales de presión en este apartado pues existe escasez de datos por el escaso tiempo de iteración que se pudo llevar a cabo.

5.2.3 Velocidad de fluidización

En este punto evaluaremos el comportamiento del lecho mediante la variación de la velocidad de fluidización. El estudio se centra en tres velocidades distintas marcadas por la relación U/U_{mf} . El siguiente cuadro resumen (tabla 5.3) especifica las generalidades de cada simulación.

CASO	Modelo de plénum	Paso de tiempo (s)	U/U_{mf}
7	B	$5 \cdot 10^{-4}$	1,5
8	B	$5 \cdot 10^{-4}$	2
9	B	$2,5 \cdot 10^{-4}$	2,5

Tabla 5.3: Resumen de casos con distinta velocidad de fluidización

5.2.3.1 Fracción de volumen de la fase sólida

Una captura instantánea del lecho resulta representativa de su dinámica como función de la velocidad de fluidización, ver figura 5.27.

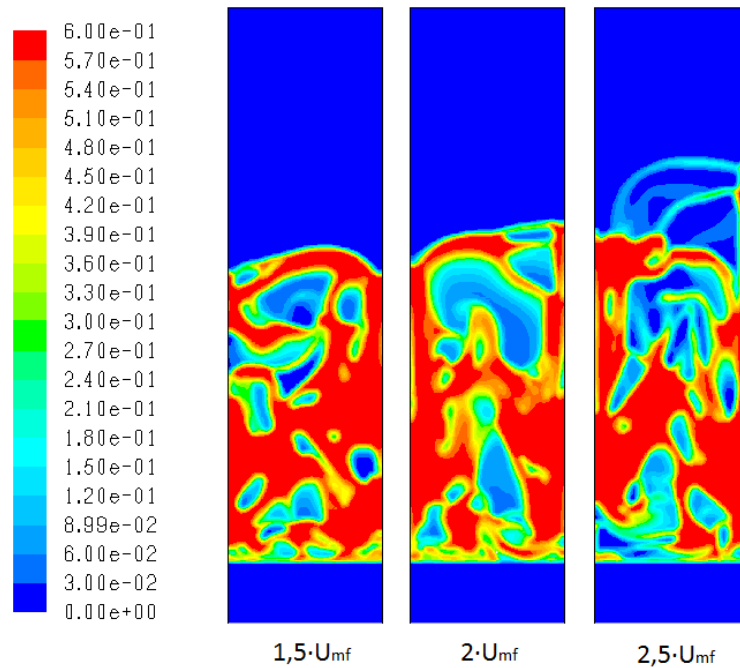


Figura 5.27: Fracción volumétrica de sólidos ($t=9s$); Casos 7,8 y 9

Gracias a estos perfiles se puede observar como al aumentar la velocidad de entrada del aire aumenta la altura del lecho y se vuelve más turbulento. Las burbujas son de mayor tamaño y el colapso de éstas en la superficie es más violento.

5.2.3.2 Velocidad de las partículas sólidas

La motivación de intentar conocer la velocidad de las partículas sólidas del lecho viene de poder decidir la velocidad de fluidización del lecho en función de las necesidades requeridas en cada procedimiento industrial en que se aplican los lechos fluidos. La figura 5.28 muestra la relación que existe entre la velocidad vertical media de las partículas sólidas del lecho en función de la posición en la columna del lecho para las tres velocidades de fluidización simuladas. La muestra se obtiene para una línea de control situada a 20 cm del fondo del lecho.

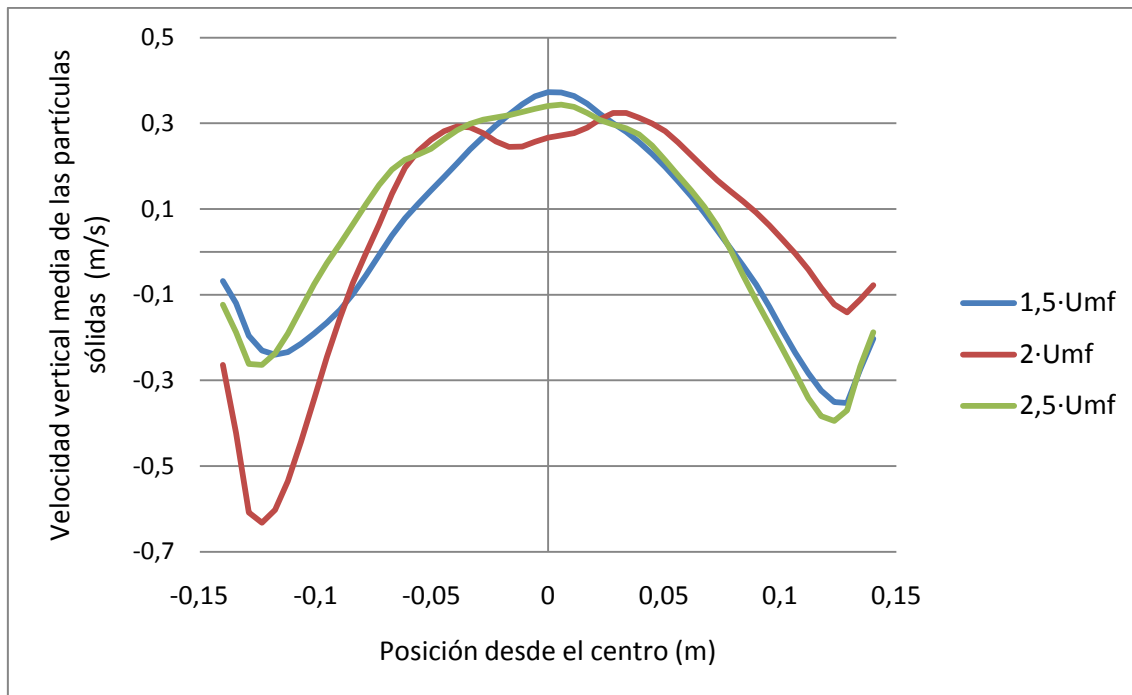


Figura 5.28: Velocidad vertical de las partículas sólidas para los casos de 1,5; 2 y 2,5 veces la velocidad de mínima fluidización ($z=20\text{cm}$)

A la vista de los resultados se podría decir que variar la velocidad de fluidización dentro de un rango comprendido entre 1,5 y 2,5 veces la velocidad de mínima fluidización no tiene gran repercusión sobre la velocidad de las partículas. Si se observa una tendencia hacia la uniformidad del perfil de velocidad al aumentar el caudal de aire. La curva obtenida para el caso de 2 veces la velocidad de mínima fluidización (CASO 8) parece mostrar un comportamiento más irregular que los otros dos casos. El motivo de esto es probablemente un error en la simulación causado por la dificultad de evitar los problemas de divergencia encontrados en dicha simulación.

De nuevo, como se comentó en el apartado 5.2.1.4, conocer la velocidad horizontal de las partículas también resulta interesante. El siguiente gráfico (Fig. 5.29) muestra el perfil representativo de la componente horizontal de la velocidad sobre la misma línea de control situada a 20 cm del distribuidor para los casos 7,8 y 9.

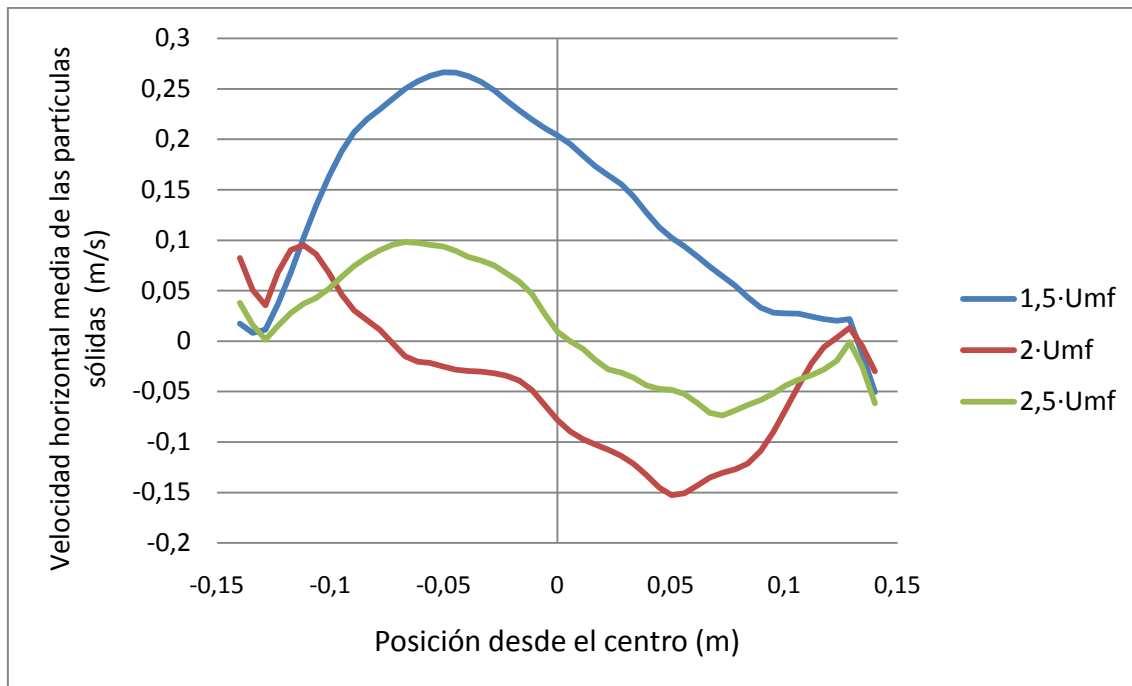


Figura 5.29: Velocidad horizontal de las partículas sólidas para los casos de 1,5; 2 y 2,5 veces la velocidad de mínima fluidización ($z=20\text{cm}$)

A diferencia de los resultados obtenidos para la velocidad vertical, la velocidad horizontal de los sólidos es muy distinta en uno caso y en otro. Sin embargo, no parece haber una relación directa entre la velocidad de fluidización y la componente horizontal de la velocidad pues los valores obtenidos para el caso de $1,5U_{mf}$ son sorprendentemente altos.

El perfil cambia de signo en el punto donde ocurre, de forma estadística, el mayor arrastre de las partículas, es decir, donde colisionan dos corrientes de partículas sólidas.

5.2.3.3 Señales de presión

Con el fin de conocer la dinámica del lecho se añade al presente documento la señal de presión de cada uno de los casos simulados en este bloque. Debido al gran número de problemas de divergencia encontrados con los casos 8 y 9 no se espera obtener un espectro de calidad que poder estudiar. Aun así se incluyen también para estudiar los resultados que se obtienen ante muestras de tamaño insuficiente.

El espectro de potencia de las señales de presión de un lecho fluido muestra que las fluctuaciones de presión en el lecho burbujeante tiene un carácter aleatorio pero se mantienen dentro de un rango de frecuencia. De entre todas las frecuencias que aparecen en el espectro, existe una frecuencia fundamental cuya señal es más elevada que la del resto de frecuencias, y como múltiplos de ésta, dos señales representativas de menor intensidad. Este fenómeno es debido a las limitaciones del método de la transformada de Fourier pues, para obtener el espectro ideal se necesitaría un conjunto infinito de datos.

Por tanto, en los espectros de potencia suelen aparecer tres valores pico claramente distinguibles debidos a comportamiento típico de los lechos fluidos burbujeantes. Sin embargo, a menudo resulta muy difícil distinguir estas frecuencias características debido a que el tamaño de la muestra recogida es pequeño y las frecuencias próximas producen un enmascaramiento de éstas. En la figura 5.30 [9] se puede ver un espectro de potencia típico. Como puede observarse, en la región de las tres frecuencias principales, la intensidad varía de forma muy rápida y drástica dependiendo del tiempo. Se observa una intensidad muy alta rodeada de valles (zonas de baja intensidad) para las frecuencias próximas. Este valor máximo se corresponde con el valor de la frecuencia fundamental de fluctuación de presión del lecho.

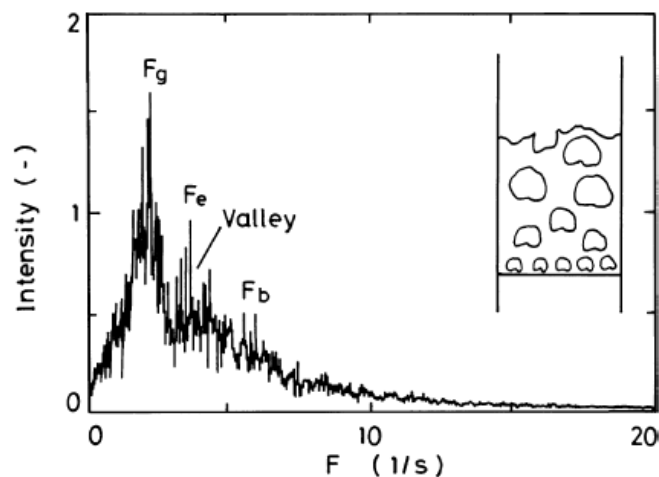


Figura 5.30: Espectro de potencia característico de un lecho fluido burbujeante. [9]

La erupción de las burbujas en la superficie produce una variación en la altura del lecho que da lugar a una fluctuación de presión a lo largo de todo el lecho fluido y la frecuencia de las erupciones es la que se conoce como frecuencia fundamental. Se puede comprobar que la frecuencia fundamental de las fluctuaciones obtenida es correcta mediante la determinación teórica de la frecuencia según la siguiente expresión [26]:

$$f_g = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{H_0}} \quad (34)$$

Donde g es el valor de la gravedad y H_0 es la altura del lecho en estado de reposo. El resultado de esta expresión es que la frecuencia característica es de 1,57 Hz, valor muy próximo a los resultados obtenidos en la simulación (Fig. 5.31).

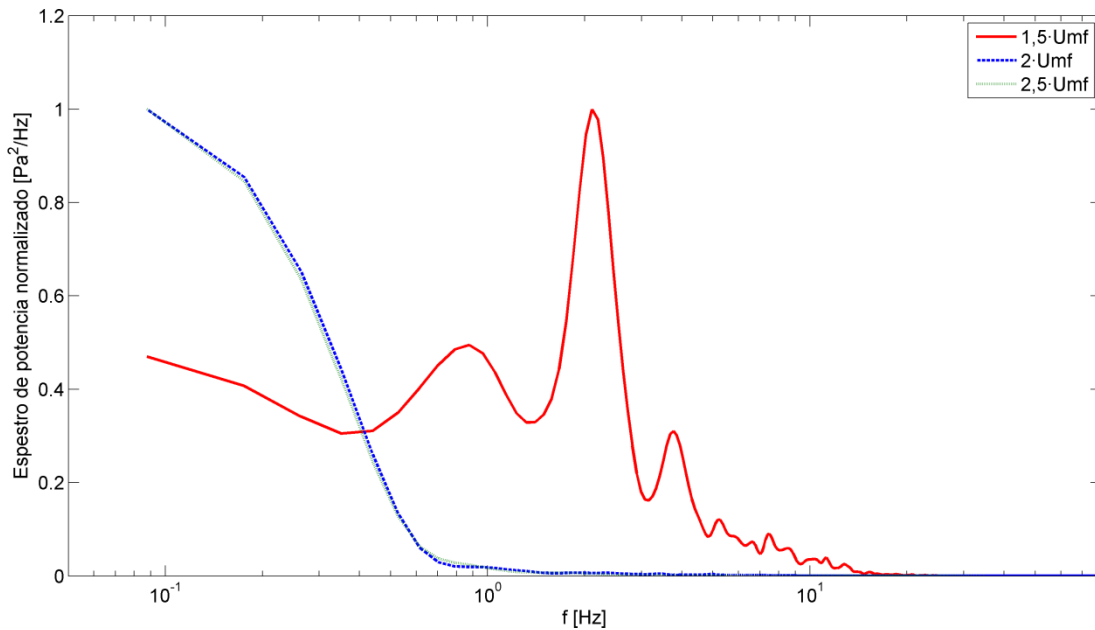


Figura 5.31: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Casos 7, 8 y 9

Tal y como era de esperar, la señal de los casos 8 y 9 es demasiado pobre y no es posible obtener un espectro adecuado. No así para el CASO 7, del cual sí se dispone del suficiente tiempo de iteración para mostrar un espectro capaz de mostrar la frecuencia fundamental de fluctuación del lecho. También es posible ver la segunda frecuencia más importante pero no así la tercera. Así pues, vemos como la frecuencia fundamental para una velocidad del aire de entrada de $1,5 \cdot U_{mf}$ se encuentra situada en 1,25 Hz ya la segunda frecuencia característica es de 2,5 Hz. El tercer pico de frecuencia no es apreciable debido a que el rango de datos empleado es insuficiente para ser apreciable la tercera frecuencia característica.

5.3 COMPARACION CON DATOS EXPERIMENTALES

En este último apartado se emplea la experiencia adquirida en los apartados anteriores para reproducir y comparar el caso experimental llevado a cabo por el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid. En este punto se mostrarán aquellos parámetros que se consideran característicos de un lecho fluido y se compara con los datos experimentales disponibles. En primer lugar se obtienen aquellos datos que son susceptibles de comparar con resultados experimentales y después se añaden otros resultados que sirven para conocer mejor la dinámica del lecho.

El siguiente cuadro resumen (tabla 5.4) recuerda las características principales de la simulación del CASO 10:

Caso	Modelo de plénium	Paso de tiempo (s)	Formulación	U/U_{mf} []	Caída de presión (%)	Tiempo de computación (horas)	Tiempo real de simulación (s)
10	B	0,0005	Gidaspow	2	50	89	12,52

Tabla 5.4: características generales CASO 10

5.3.1 Fracción de volumen de sólidos

En este primer punto se muestra, con carácter ilustrativo, una captura instantánea de la fracción de volumen de la fase densa en la que se puede apreciar el tamaño de burbuja así como el carácter de la fluidización para el CASO 10 (Fig. 5.32 (a)). En ella se puede ver como la mayor anchura de este modelo computacional provoca una menor concentración de burbujas que en modelo computacional empleado en el bloque 2 para el CASO 8 (Fig. 5.32 (b)) para las mismas condiciones operativas de pérdida de carga y velocidad de fluidización. Este hecho es debido a que la velocidad superficial es más alta y el tamaño de las partículas a aumentado. Al haber mayor concentración de burbujas en el CASO 8 el lecho responde mediante una mayor altura de la superficie.

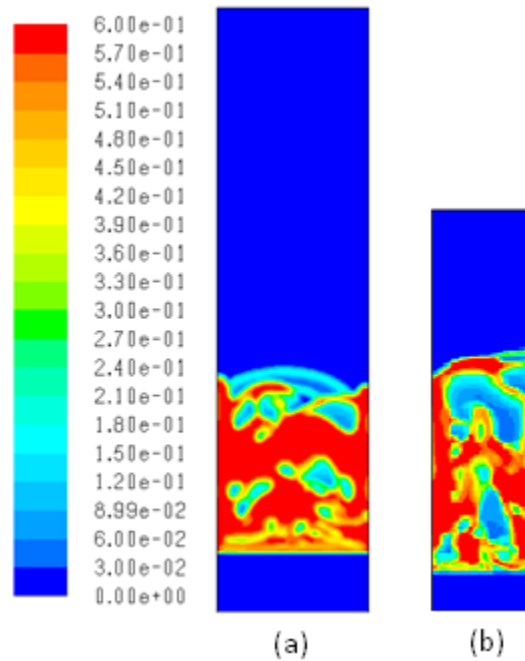


Figura 5.32: Captura instantánea de fracción de volumen de partículas sólidas ($t=12s$); CASO 10 (a) y CASO 8 (b)

A continuación se compara la fracción de volumen de fase sólida de forma estadística para los datos obtenidos en la simulación (Fig. 5.33) y los resultados recogidos experimentalmente (Fig. 5.34):

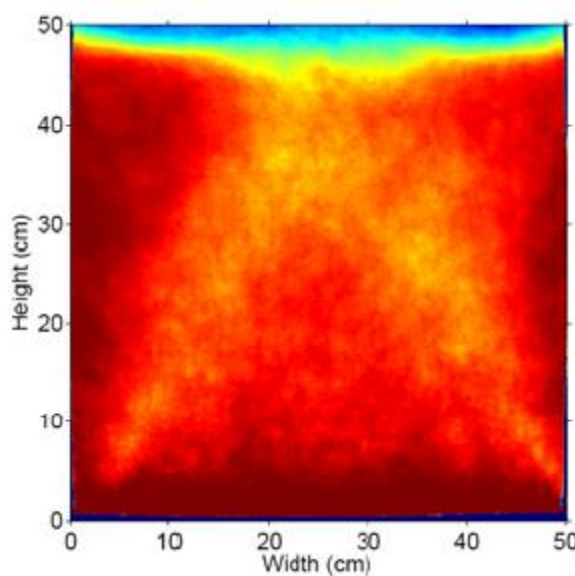


Figura 5.33: Fracción volumétrica mediada partículas sólidas el caso experimental

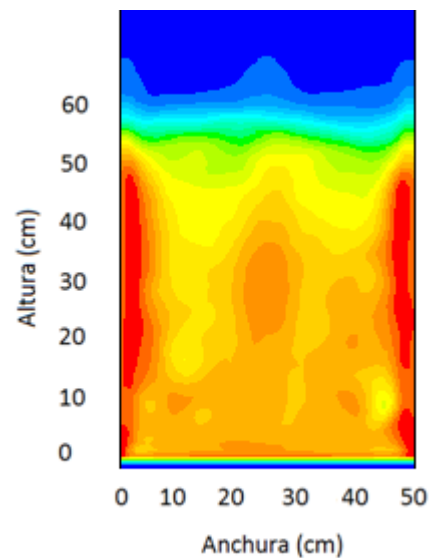


Figura 5.34: Fracción volumétrica de en partículas sólidas en el caso simulado



Los resultados de la comparación muestran cierta semejanza entre el estado del lecho experimental y el lecho simulado ya que en torno a las paredes de la columna de lecho se acumula mayor cantidad de partículas densas. Esto es debido a la interacción de ambas mediante un coeficiente de fricción que reduce la velocidad de las partículas al entrar en contacto con las paredes a través de una pérdida de energía cinética. También en la zona central se observa que la densidad de fase densa es mayor. Aunque no se aprecie de forma tan evidente en la simulación también aparecen las franjas diagonales en las que la concentración de aire es mayor y las regiones que éstas dividen donde predomina la presencia de fase sólida. Sin embargo, la altura que alcanza el lecho es algo mayor en el caso simulado que en el experimental. Este fenómeno puede deberse a que el caso simulado producía mayor agitación del lecho que el experimental.

5.3.2 Velocidad de las partículas sólidas

En el experimento llevado a cabo en el Departamento de ingeniería Térmica y de Fluidos [97] se contaba con dos modelos de distribuidor de aire distintos para poder evaluar la influencia de los inyectores del aire sobre el comportamiento del lecho. La llevar a cabo la comparación del caso experimental y el simulado hay que fijarse en el modelo de distribuidor tipo 1 empleado en el caso experimental ya que se asemeja más al modelo de la simulación del CASO 10.

Por tanto a continuación se incluyen los perfiles estadísticos de velocidad vertical de la fase densa del modelo experimental (Fig. 5.35) y del caso simulado (Fig. 5.36). Además se incorpora según se ha hecho en apartados anteriores la componente horizontal de la velocidad de las partículas. Los datos se recopilan estadísticamente sobre una línea de control situada a 20cm del distribuidor.

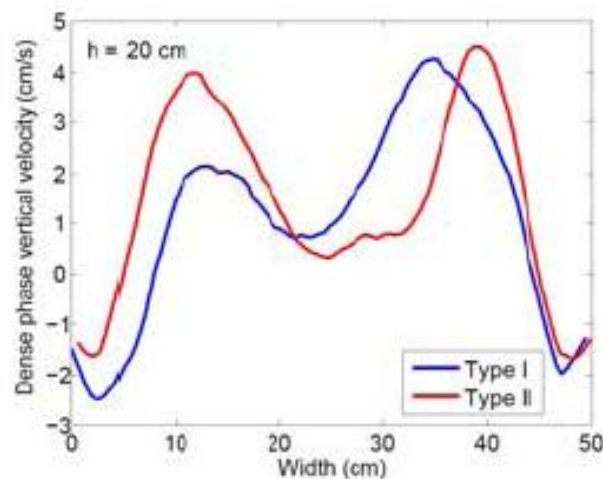


Figura 5.35: Velocidad vertical de las partículas sólidas en el caso experimental ($z=20\text{cm}$)

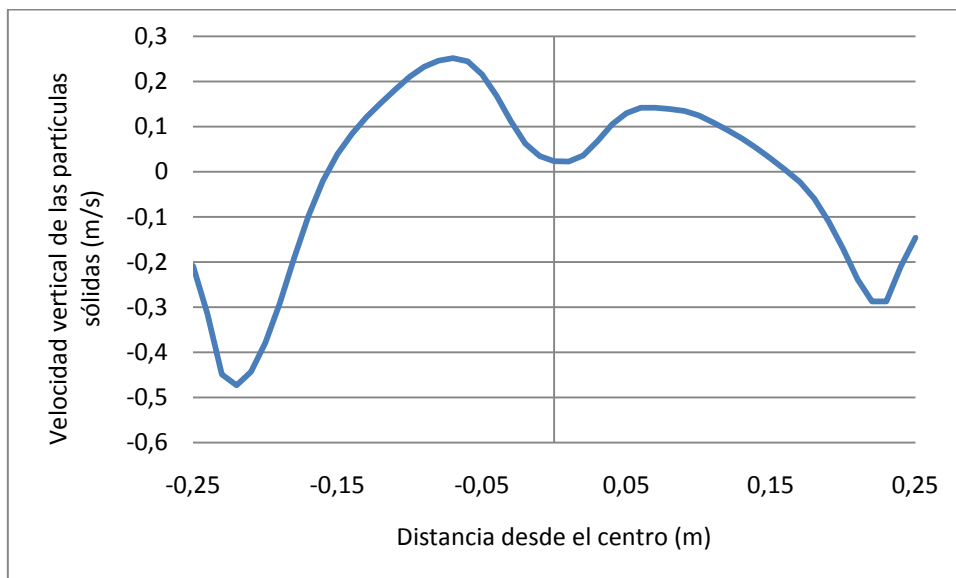


Figura 5.36: Velocidad vertical de las partículas en el caso simulado ($z=20\text{cm}$); CASO 10

Comparando los resultados de los dos gráficos anteriores encontramos un perfil de la velocidad vertical de las partículas similar pero con la diferencia de que la velocidad media de la fase densa es, en valor absoluto, mucho menor en el caso simulado que en el experimental. La causa de estos resultados viene dada por el hecho de que la simulación en 2D no hace diferencia entre la pared delantera del lecho y la pared trasera por lo que no se considera la fricción que hace reducir la velocidad vertical.

De nuevo se incluye la componente horizontal de la velocidad de las partículas sobre la línea media del lecho, situada a 22,5 cm (Fig. 5.37).

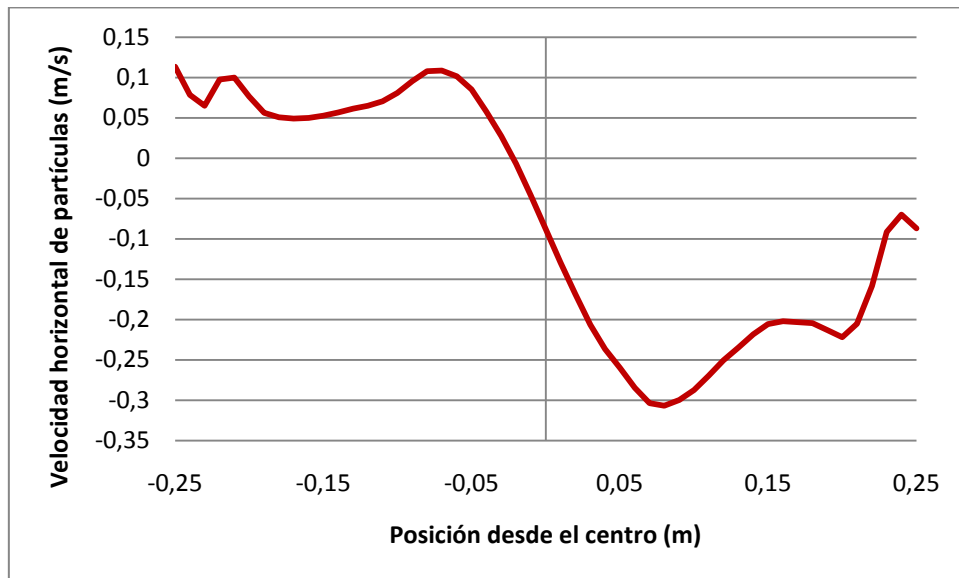


Figura 5.37: Velocidad horizontal de las partículas sólidas en el caso simulado ($z=22,5\text{cm}$); CASO 10

De nuevo se observa como dos corrientes de partículas colisionan en el punto donde la velocidad se hace nula, cercano al centro del lecho. En ese punto se encuentra el mayor caudal de partículas en ascensión.

5.3.3 Señales de presión

En este apartado se incluyen cuatro espectros de potencia correspondientes con los resultados experimentales (Fig. 5.38) y los datos de la simulación (Fig. 5.39, 5.40 y 5.41). Mediante los resultados obtenidos se pretende comprobar la validez de la simulación llevada a cabo para el CASO 10 al enfrentarlos a los datos experimentales disponibles.

En el experimento llevado a cabo, Sánchez- Delgado et al. [25], se instalaron tres sensores diferenciales de presión a diferentes alturas sobre la vertical: un sensor en el plénum, otro a la salida del distribuidor y otro a mitad del lecho ($z=22,5\text{cm}$). En la simulación se establecieron puntos de control en los mismos lugares que en el caso experimental y se añadió tres sensores más repartidos sobre la línea vertical para hacer un barrido más completo del lecho. El objetivo de añadir estos nuevos sensores

es caracterizar el espectro de presión para todo el rango de alturas del lecho (Fig. 5.40).

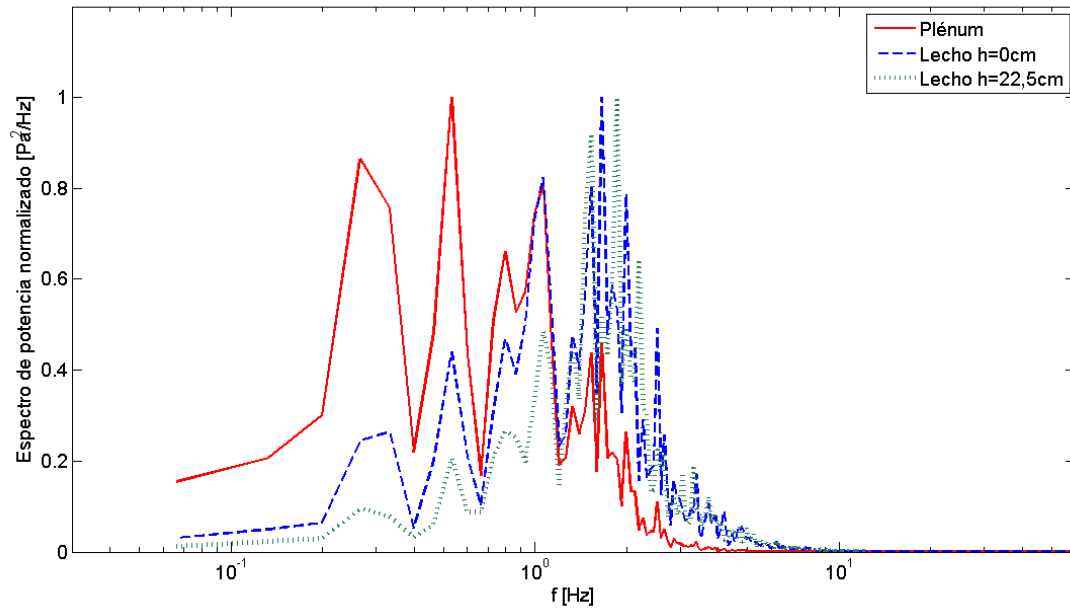


Figura 5.38: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Datos experimentales

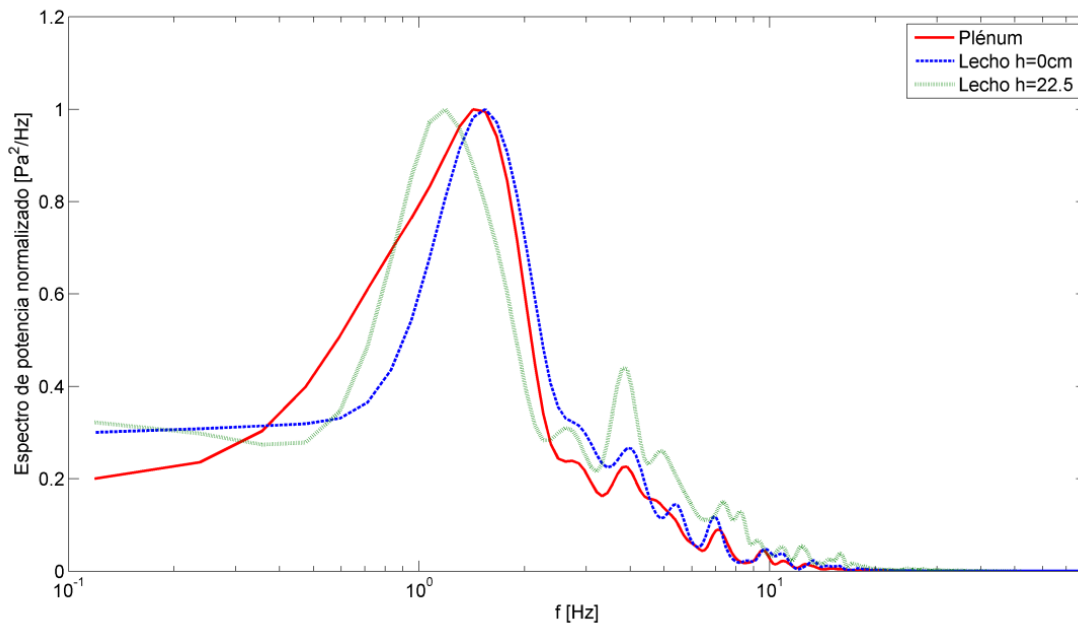


Figura 5.39: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Caso 10



Estos espectros de potencia vuelven a mostrar que las fluctuaciones de presión en el lecho burbujeante son aleatorias, pero se mantienen dentro de un rango de frecuencia. Si realizamos de nuevo la comprobación para verificar cuál es la frecuencia fundamental (Ecuación 34) tenemos que la teoría especifica una frecuencia principal de 1,49 Hz, valor al que se aproximan los resultados mostrados en los espectros de ambos casos, el experimental y el de simulación. Los picos que existen en el espectro experimental a frecuencias menores que la fundamental son debidos a otros efectos no contemplados en la simulación, como puede el efecto de la tridimensionalidad del lecho real o el movimiento inevitable del mismo oscilando en torno a su bancada.

Al observar el espectro de los valores de presión obtenidos por Sánchez-Delgado et al. [25] se aprecia que la señal posee muchas variaciones debidas a ruido como fruto de no tener un espectro para un periodo de tiempo más largo. En cuanto al espectro del modelo numérico, existe una variación en la frecuencia fundamental obtenida para el punto situado a 22,5cm fruto de un desajuste de tiempo en los datos extraídos desde FLUENT. Este error puede venir provocado por los problemas de divergencia de la simulación, que obligaban a retroceder en el tiempo de simulación para reajustar las condiciones operativas del modelo así como el número de iteraciones por paso de tiempo. De todas formas, la variación no es excesiva y los resultados siguen siendo útiles ya que el valor de frecuencia fundamental obtenido es muy próximo al valor teórico (ecuación 34).

No se dispone de datos experimentales de las sondas de presión para otras posiciones en el lecho pero se incluyen también los resultados de la simulación por ser de igual forma interesantes. En la siguiente figura (Fig. 5.40) se muestra el espectro de presión obtenido para los puntos situados en: el plénum, a la salida del distribuidor y a 10, 22'5, 30 y 45 cm de altura desde el fondo del lecho. En la figura 5.41 se representa el mismo espectro normalizado.

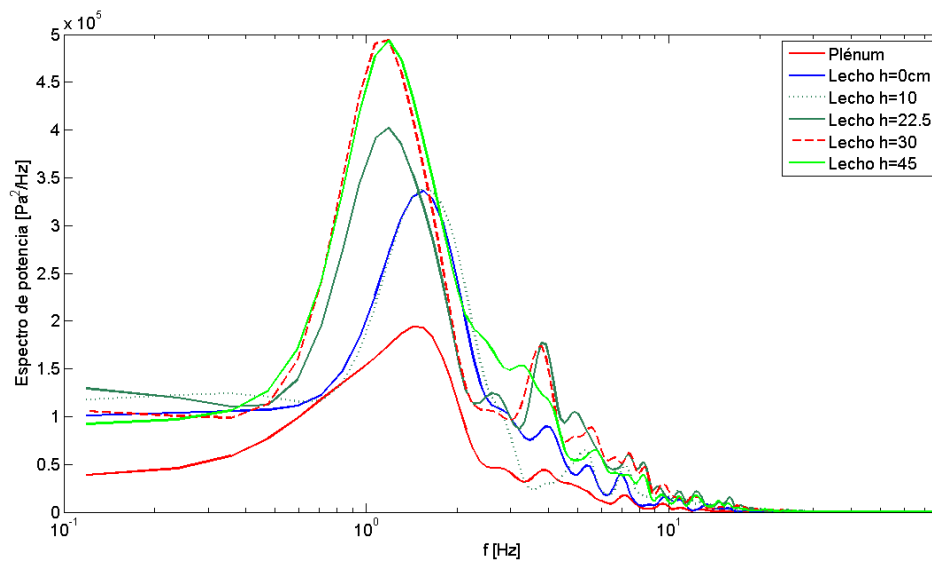


Figura 5.40: Espectro de potencia de la señal de presión; Caso 10

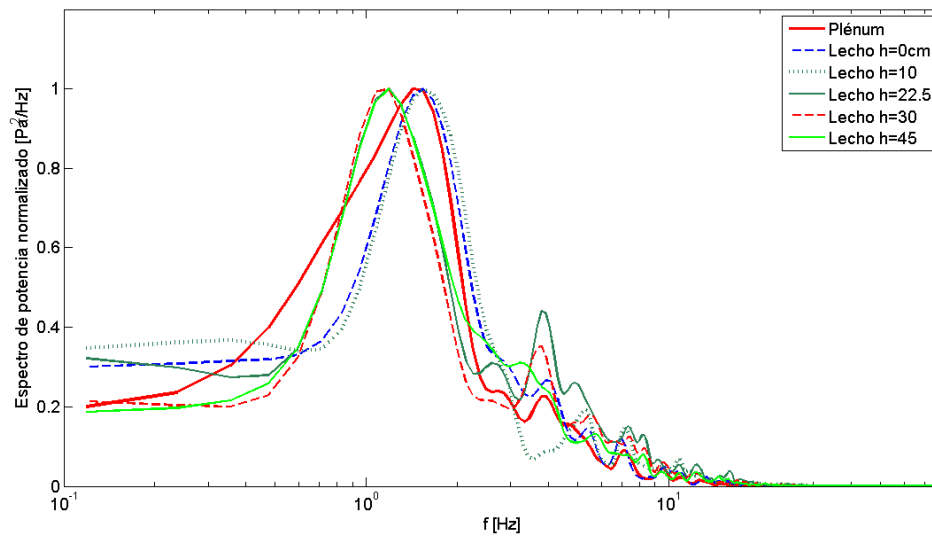


Figura 5.41: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Caso 10

Al visualizar estos espectros vemos como la frecuencia fundamental es la misma sea cual sea el punto en el que se sitúe el sensor de presión, salvo el error ocasionado por las dificultades mencionadas anteriormente.

5.3.4 Frecuencia de paso de burbujas

La siguiente evolución temporal de señal muestra la fracción de volumen de aire a través de la señal realizado mediante la transformada de Fourier. Con él se puede ver cuál es la frecuencia de paso de burbujas sobre un sensor situado en el centro del lecho ($z=22,5\text{cm}$).

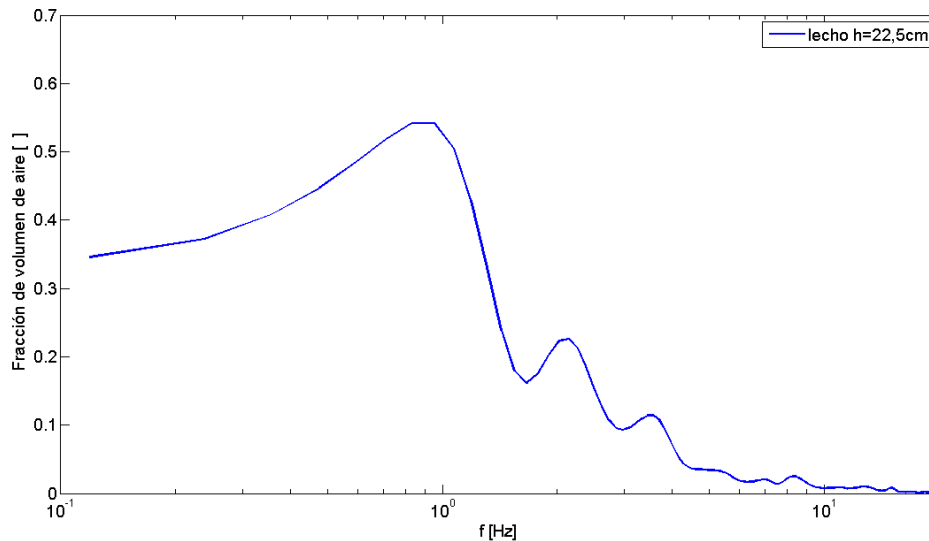


Figura 5.42: Evolución temporal de fracción de volumen de fase sólida; Caso 10

A la vista de los resultados no es posible determinar si la frecuencia de burbujeo es la correspondiente al primer o al segundo pico pues el primero puede ser debido a la falta de resolución de la señal a bajas frecuencias. Se hace necesario disponer de una serie temporal mayor para mejorar la resolución.

5.3.5 Velocidad del aire sobre el distribuidor

El siguiente gráfico muestra el perfil de velocidad vertical medio a lo largo del tiempo de iteración del aire sobre la superficie del distribuidor, en la entrada al lecho (Fig. 5.43).

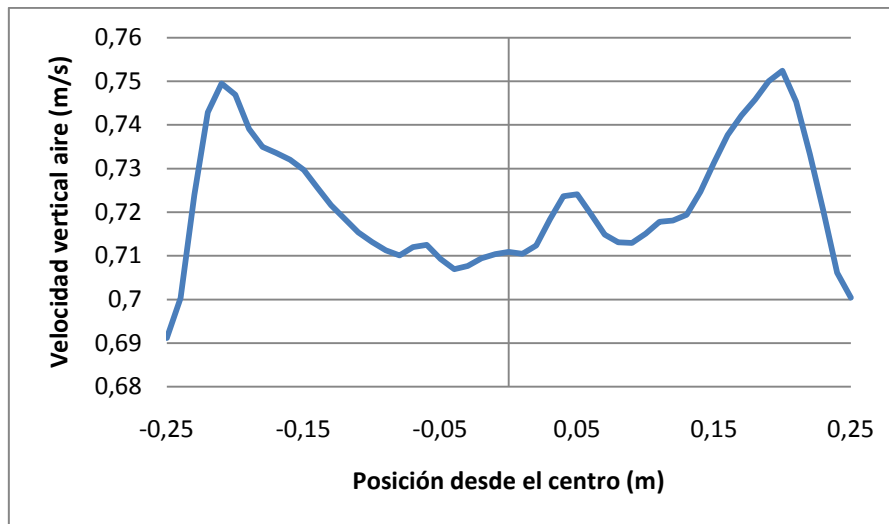


Figura 5.43: Velocidad vertical del aire sobre el distribuidor ($z=0$); CASO 10

Una vez más encontramos un perfil de velocidad no uniforme aunque esta vez sí es bastante simétrico. No se dispone de datos experimentales con los que comparar pero se considera que este tipo de muestras es de gran interés para caracterizar el lecho por lo que se incluye también en el presente documento.

5.3.6 Fracción de volumen de aire

La cantidad de aire que circula por el lecho no es igual para todos los puntos de éste. Representar la fracción volumétrica media de aire a lo largo de una línea de control ubicada en la mitad del lecho ($z=22,5\text{cm}$) puede aclarar que regiones son las que poseen mayor caudal de aire y, por lo tanto, mayor probabilidad de paso de burbuja (Fig. 5.44).

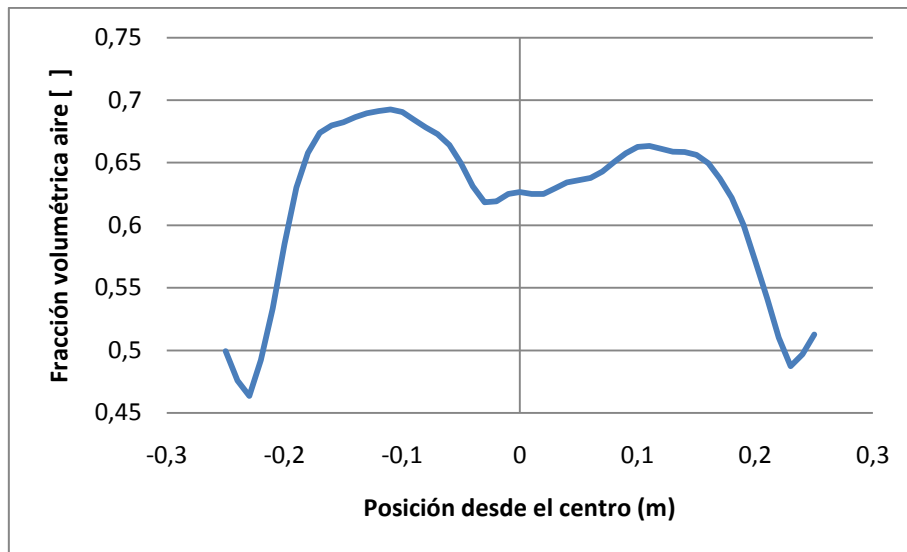


Figura 5.44: Fracción volumétrica de aire sobre línea de control ($z=22,5\text{cm}$)

Si observamos el perfil se puede deducir que el aire encuentra dos caminos preferidos de paso en cada una de las crestas que aparecen en el gráfico. Además, estadísticamente es mayor el flujo de aire por la mitad izquierda de la columna del lecho.

5.3.7 Velocidad de ascensión de las burbujas

Mediante la evolución temporal de la señal de la fracción de volumen de fase gaseosa a lo largo del tiempo sobre una serie de puntos de control situados a lo largo de una línea vertical, es posible determinar de forma aproximada la velocidad de subida de las burbujas a través del lecho. A continuación se muestra dicha señal sobre tres puntos situados en la línea vertical central del lecho a una altura de 10cm (Fig. 5.45), 20cm (Fig. 5.46) y 30cm (Fig. 5.47). Con objeto de visualizar mejor el paso de una burbuja se ha buscado un instante de tiempo en el que una burbuja de gran tamaño circula sobre estos puntos.

De esta forma, al conocer el desplazamiento de la burbuja -como resultado de la diferencia de altura entre el punto más bajo y el más alto- y el tiempo que tarda en recorrer ese espacio -obtenido mediante la evolución temporal de la señal- podemos conocer la velocidad de ascensión de las partículas.

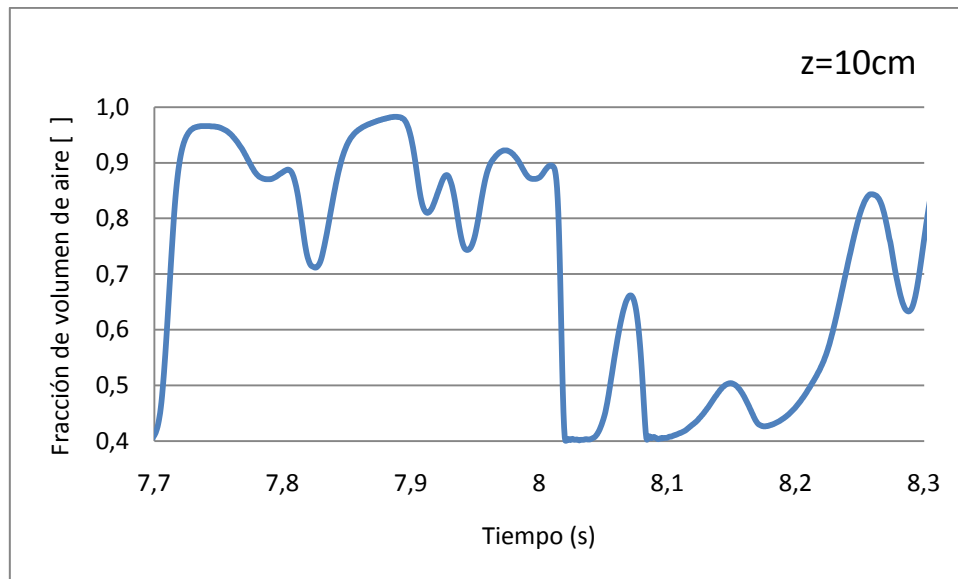


Figura 5.45: Fracción volumétrica de aire sobre punto situado a 10cm del fondo del lecho

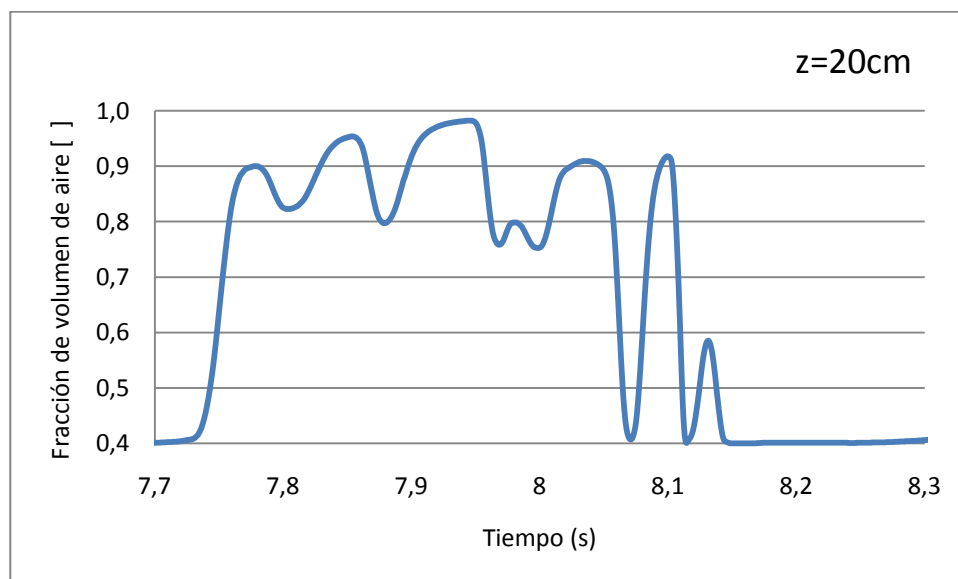


Figura 5.46: Fracción volumétrica de aire sobre punto situado a 20cm del fondo del lecho

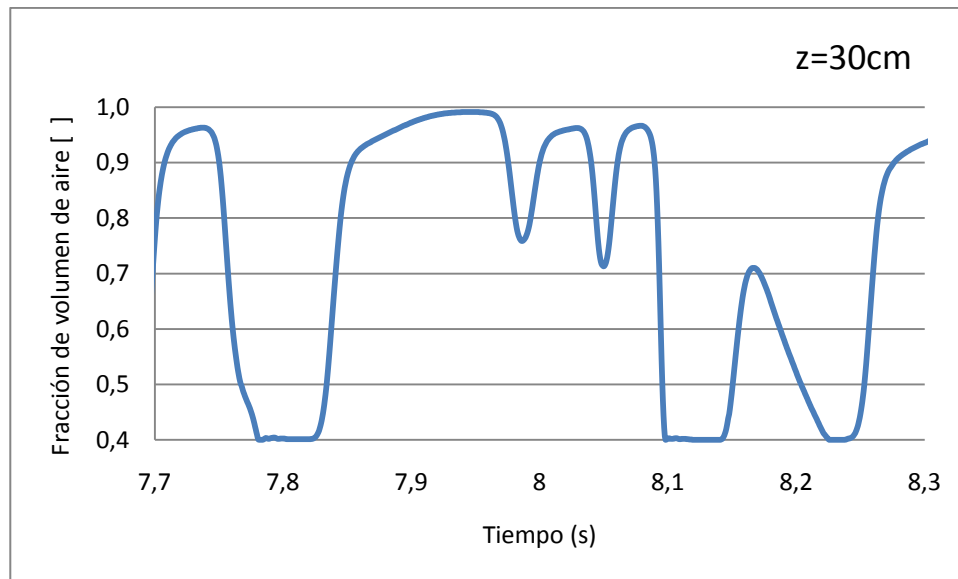


Figura 5.47: Fracción volumétrica de aire sobre punto situado a 30cm del fondo del lecho

Como se puede observar, existe una zona que abarca la mayor parte de la señal en la que la fracción volumétrica de aire es muy elevada. Ese periodo de tiempo está marcado por la presencia de una burbuja de aire sobre el punto de control. Si observamos uno de los bordes (se escoge el inferior por ser el que corresponde con la parte inferior de la burbuja) vemos la progresión de la burbuja.

Para ayudar a visualizar el efecto se pueden superponer los tres gráficos de la siguiente forma (Fig. 5.48).

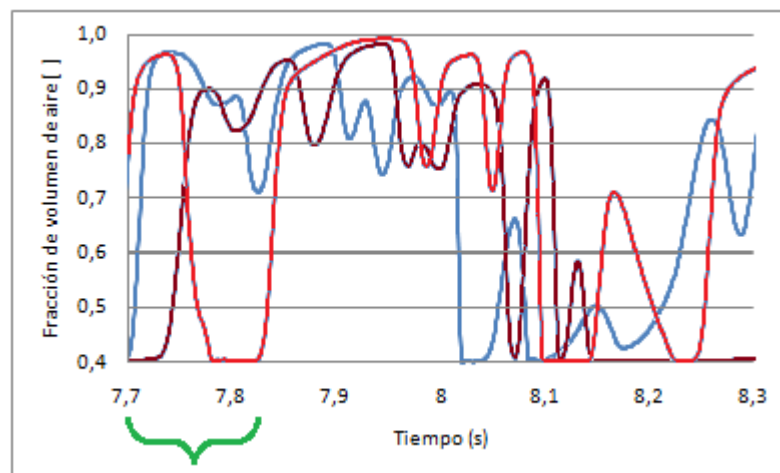


Figura 5.48: Superposición de la señal de fracción de volumen de aire



Como se puede ver, el rango marcado con un corchete verde es el intervalo de tiempo que transcurre entre el paso de la burbuja de aire por el punto de control situado a 10cm y el punto situado a 30cm. De esta forma, mediante un sencillo cálculo (ecuación 35) se puede determinar la velocidad aproximada de subida de las burbujas de aire por el lecho:

$$v_{subida} = \frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{0,30-0,10}{7,83-7,70} = 1,54m/s \quad (35)$$

Por lo tanto, la velocidad característica de ascensión de las burbujas de aire se encuentra en torno a 1,5m/s. Este es un valor con poca precisión ya que no se conoce con exactitud la forma de la burbuja seleccionada, ya que puede deformarse y de esa forma restar precisión al método empleado. Para determinar con más precisión este valor serían necesarias técnicas de captura ópticas capaces de fotografiar el lecho y determinar la posición de las burbujas en cada instante de tiempo.

6. CONCLUSIONES

6.1 RESUMEN DE LAS TAREAS REALIZADAS

Las tareas llevadas a cabo a lo largo de la realización del proyecto son las siguientes:

1. Búsqueda bibliográfica y ejercicio de aprendizaje para la introducción al campo de los lechos fluidizados y a la simulación CFD de tipo euleriana-euleriana de dos fluidos.
2. Introducción al manejo del código comercial FLUENT como base de las simulaciones mediante la reproducción del ejemplo 2.3 disponible en la ayuda tutorial que proporciona el fabricante.
3. Reproducción y comparación de un estudio computacional sobre un lecho fluidizado: Evaluación del modelo de formulación y actuación sobre el paso de tiempo y velocidad de fluidización; CASOS 1, 2, 3 y 4.
4. Incorporación de los efectos del plénum y del distribuidor. Búsqueda de condiciones operativas óptimas mediante el estudio de:
 - 4.1 Dos modelos de plénum: CASOS 5 y 6
 - 4.2 Introducción de pérdida de presión en el distribuidor: CASOS 6 y 8
 - 4.3 Variación de la velocidad de fluidización: CASOS 7, 8 y 9
5. Comparación con datos experimentales: caracterización mediante señales de presión; CASO 10.

El siguiente cuadro resume la consecución de los casos de simulación llevados a cabo según los objetivos de cada fase (tabla 6.1):

Fase	Objetivos	Procedimiento
1	Introducción al campo de los lechos fluidizados y las simulaciones CFD	Búsqueda bibliográfica
2	Conocer el lenguaje de programación del código comercial FLUENT	Reproducción del CASO EJEMPLO 2.3 del tutorial
3	Reproducción y comparación de un estudio previo sobre un modelo Euleriano-Euleriano	Simulación de una columna de 2D. CASOS 1, 2, 3 y 4
4	Introducir los efectos del plénum y del distribuidor de aire al modelo de simulación CFD	Realización de los CASOS 4, 5, 6, 7, 8 y 9
5	Comparación con datos experimentales	Realización del CASO 10

Tabla 6.1: Resumen de tareas realizadas

6.2 PRINCIPALES RESULTADOS

A continuación se mostrarán en forma resumida los resultados obtenidos durante la realización del proyecto. Sólo se comentarán lo más relevante de tal modo que para conocer más de las características de cada simulación se remite al apartado donde fueron analizados en mayor profundidad.

6.2.1 Reproducción y comparación de un estudio computacional sobre un lecho fluidizado

El primer paso del proyecto consiste en conseguir reproducir los resultados de estudios sobre lechos fluidizados realizados por otros autores y disponibles en la literatura abierta.

En primer lugar se evalúa el estado de la fluidización en función de los modelos de ecuaciones de Syamlal-O'Brien y Gidaspow para pasos de tiempo distintos mediante la fracción de volumen de fase sólida en varios instantes de tiempo (apartados 5.1.1 y 5.1.2). El resultado es que la formulación de Gidaspow (Fig. 6.1 (d), CASO 3) produce un lecho más estable, con burbujas más uniformes, definidas y de mayor tamaño que la formulación de Syamlal-O'Brien (Fig. 6.1 (b), CASO 1). Esa inestabilidad repercutió también en la simulación del caso; se encontraron mayores problemas de divergencia en los casos que emplean la formulación de Syamlal-O'Brien.

Por otro lado, al reducir el paso de tiempo (Fig. 6.1 (c), CASO 2) la altura del lecho fluidizado se redujo. Ninguna de las simulaciones produjo un tamaño de burbuja tan grande como el de la simulación llevada a cabo en el experimento del artículo (Fig. 6.1 (a)). El motivo por el cual las burbujas de aire en el caso de la simulación con la que se compara la realizada en el proyecto tengan un perfil tan poco definido (Fig. 6.1 (a)) es síntoma de que se empleó un modelo de discretización de primer orden en el caso del artículo. Se aprecia también que la altura del lecho es ligeramente inferior en el caso de la B.C.U.

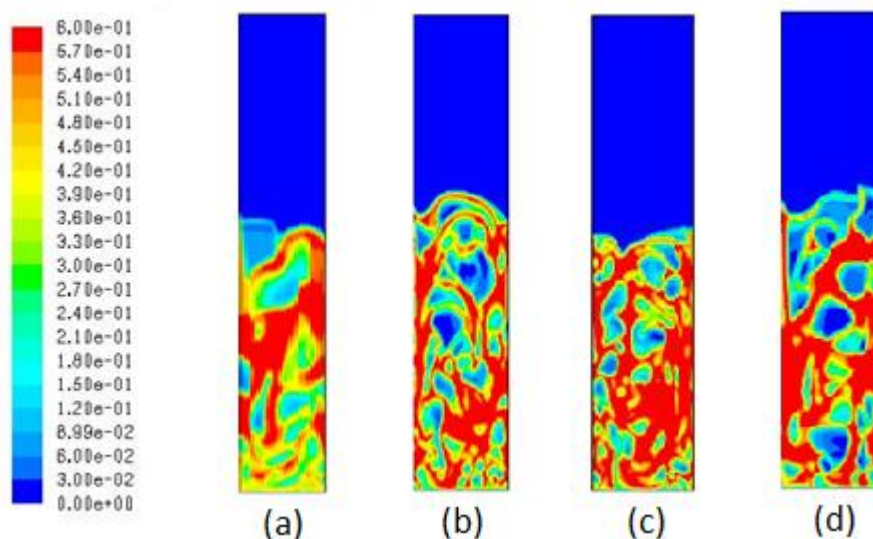


Figura 6.1: Fracción de sólidos ($t=3s$); CASOS 1, 2 y 3

Al comparar la relación entre velocidad de fluidización y altura del lecho obtenida en la simulación del artículo (Fig. 6.2 (a)) y la obtenida en el presente proyecto (Fig. 6.2 (b)), podemos corroborar como la altura del lecho es menor en el caso de la B.C.U. (apartado 5.1.3).

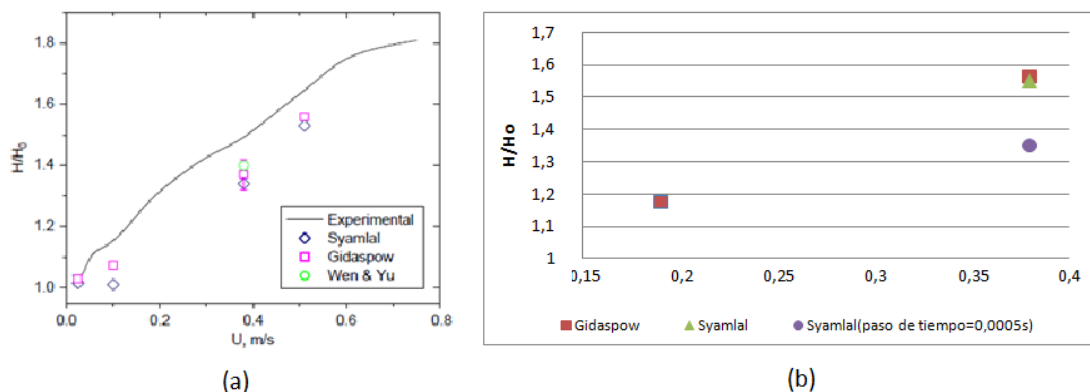


Figura 6.2: Altura del lecho para distintas velocidades de fluidización; CASOS 1, 2, 3 y 4

La velocidad de las partículas sólidas es un parámetro que debe conocerse en cualquier proceso que emplee los lechos fluidizados. Es por ello que se comparan los perfiles de velocidad media de los sólidos sobre el fondo de la columna del lecho para la simulación de referencia (Fig. 6.3 (a)) y la llevada a cabo en el CASO 1 (Fig. 6.3 (b)), comparando ambas a su vez con la curva teórica (ecuación 33).

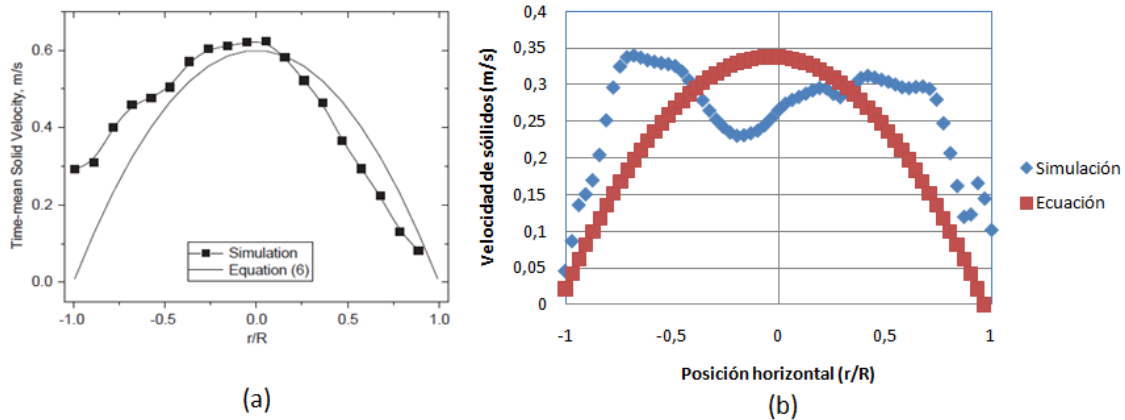


Figura 6.3: Velocidad de las partículas sólidas sobre el fondo del lecho

El perfil obtenido en la simulación del CASO 1 es más parecido a un perfil real (ver figura XX donde se muestran los resultados obtenidos por Sergio Sánchez) que el del artículo, posiblemente debido a que emplearon un modelo de malla muy grueso.

6.2.2 Efecto de la inclusión del plénum

A la hora de incorporar el plénum y el distribuidor a las simulaciones conviene tener muy en cuenta el modelado de los mismos así como las condiciones operativas que se deben establecer para que la simulación teórica reproduzca las condiciones físicas reales de este tipo de elementos.

6.2.2.1 Modelos de plénum

Se han ensayado dos modelos de plénum para ver cuál de ellos resulta el mejor método de simulación de los plénum reales.

Para poder decantarse por un modelo u otro se compara en primer lugar la velocidad del aire a la entrada al lecho (Fig. 6.4). El perfil que se asemeja más a la curva teórica es el correspondiente al modelo B (apartado 4.2.2.2), siendo de momento el mejor modelo de plénum.

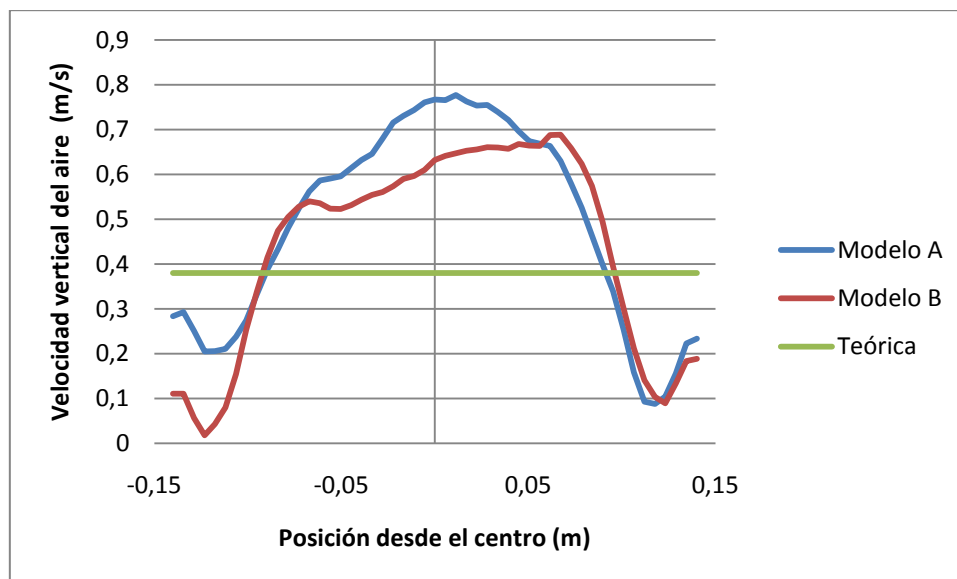


Figura 6.4: Velocidad vertical del aire sobre el distribuidor ($z=0$); Modelos A y B Frente a curva teórica

Si se analiza la señal obtenida de fracción de volumen de aire sobre la línea media del lecho se puede comprobar el grado de simetría en el comportamiento del lecho (Fig. 6.5). En él se observa como el modelo de plénum B dota al lecho de un comportamiento más simétrico que el modelo A, lo que es indicativo de una mayor

estabilidad en los resultados de simulación para el caso del modelo B, pues se alcanza más fácilmente una media temporal simétrica. Asociado a este hecho se produce una velocidad vertical de las partículas sólidas más uniforme con el empleo del modelo B (Fig. 6.6).

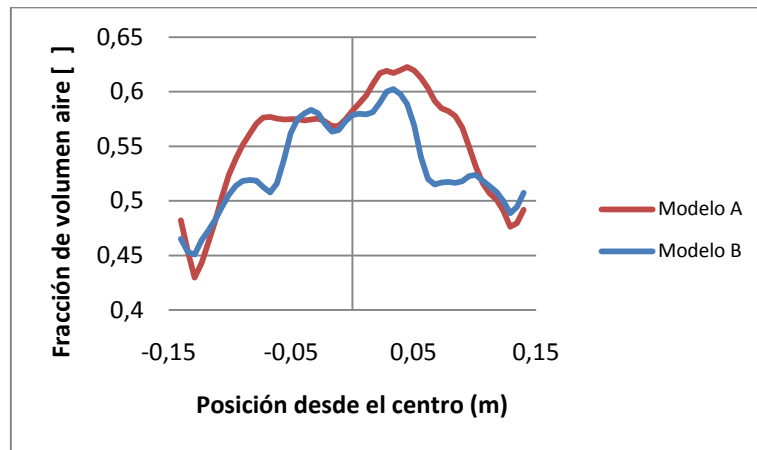


Figura 6.5: Fracción volumétrica de aire ($z=20\text{cm}$); Modelos A y B

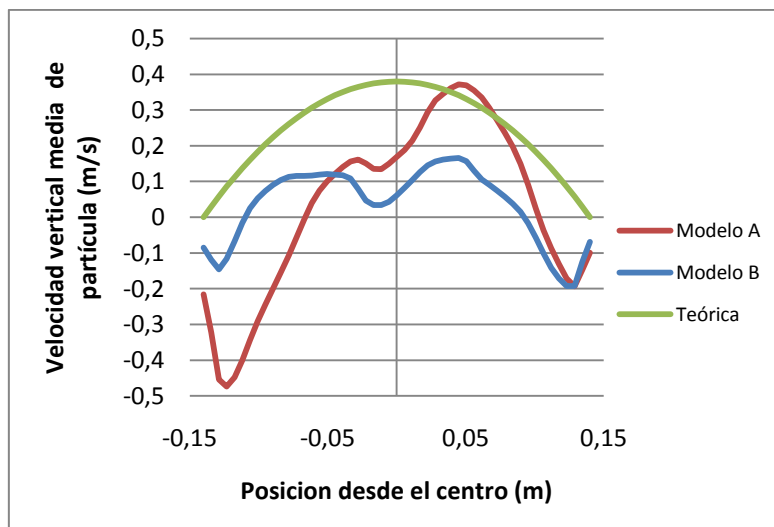


Figura 6.6: Velocidad vertical de las partículas sólidas ($z=20\text{cm}$); Modelos A y B

Para ayudar a comprender la raíz de los problemas que aparecen en el modelo de plénium A se adjunta el perfil de vectores velocidad del aire en la superficie del lecho (Fig. 6.7). Obsérvese como se forman unos remolinos de gran violencia como resultado de la colisión directa de las corrientes de entrada. Este fenómeno es inexistente en los modelos reales dado que el efecto del espesor ayuda a relajar el flujo y reduce la turbulencia.

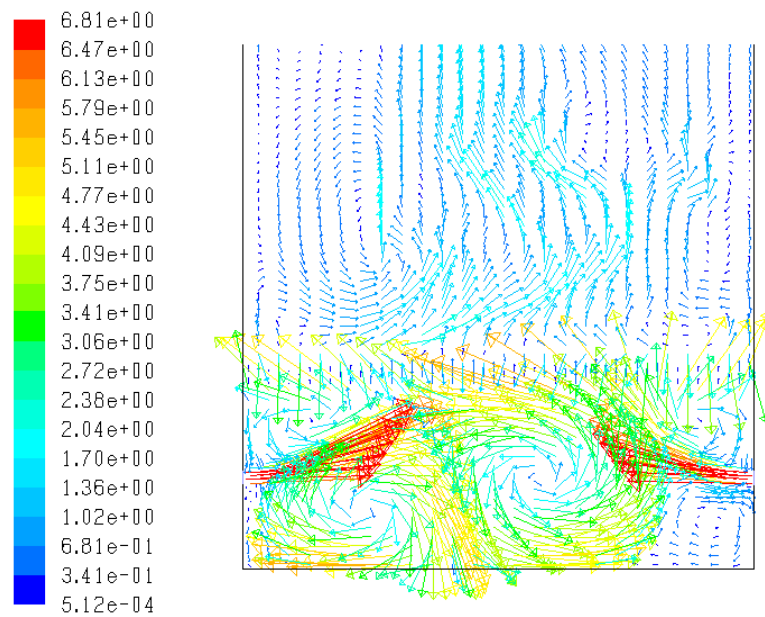


Figura 6.7: Vectores de velocidad del aire ($2 \cdot U/U_{mf}$); Modelo A

6.2.2.2 Caracterización del distribuidor de aire

La incorporación del distribuidor de aire a los modelos de simulación requiere evaluar la influencia de considerar la pérdida de carga propia de este tipo de dispositivos. En este punto se realiza la misma simulación para un distribuidor sin pérdida de carga (CASO 6) y para una caída de presión del 50% (CASO 8) con una velocidad de entrada del aire correspondiente a 2 veces la velocidad de mínima fluidización para ambos casos (apartado 4.2.2.1).

El perfil de presión estática obtenido para una línea vertical que recorre el dominio de la columna del modelo (Fig. 6.8) muestra la caída de presión existente en el distribuidor (corresponde con el origen de la coordenada "x"), siendo nula para el caso sin pérdida de carga (CASO 6) y con un valor de 4800 Pa para la simulación que pretende lograr el 50% de caída de presión (CASO 8). Aquí se obtuvo un problema para la implementación de la caída de presión requerida sobre el código FLUENT pues, transcurridos los 5 primeros segundos de iteración aproximadamente, la pérdida de carga se disparó desde los 2943 Pa hasta los 4800 obtenidos. El motivo de este fenómeno es desconocido ya que se realizaron numerosas pruebas de pérdida de presión antes de comenzar con la simulación definitiva.

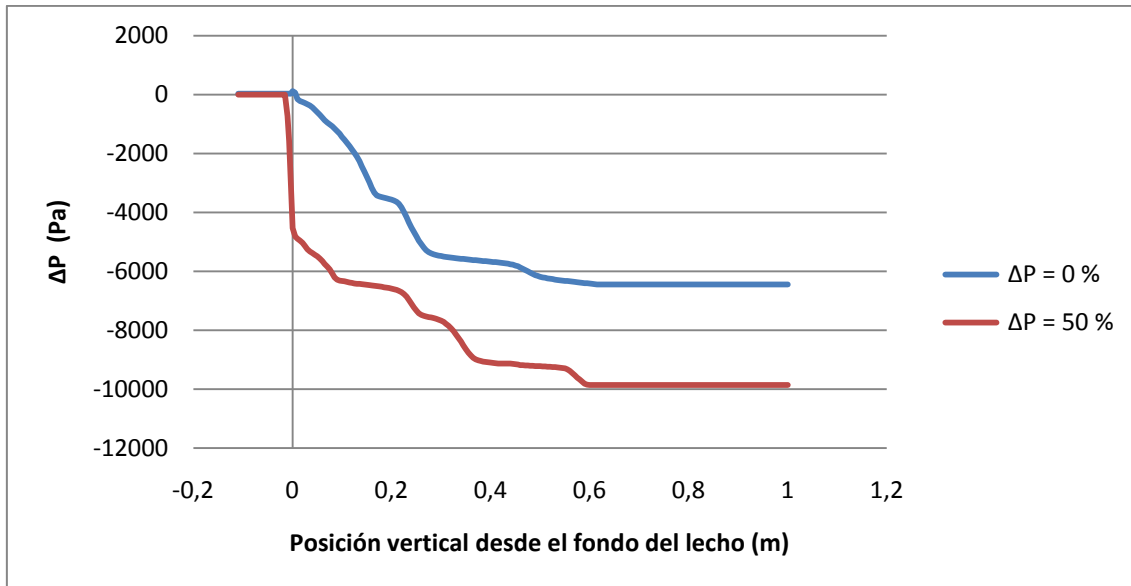


Figura 6.8: Caída de presión en el distribuidor; CASOS 6 y 8

A pesar de no haber obtenido la pérdida de carga deseada sigue siendo interesante comparar ambos casos para evaluar la influencia de la presencia de un distribuidor de aire. Si enfrentamos los perfiles de fracción de volumen de fase densa (Fig. 6.9) podemos observar como al imponer una caída de presión, las burbujas que aparecen sobre el lecho tienen un carácter menos turbulento (Fig. 6.9 (b)) que en la simulación del CASO 6 (Fig. 6,9 (a))

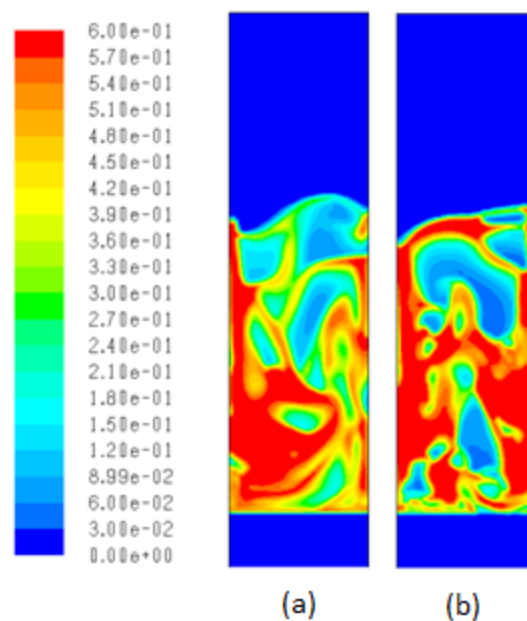


Figura 6.9: fracción volumétrica de sólidos para los casos de simulación 6 y 8

Otra comprobación que se hace es comparar la velocidad del aire sobre el distribuidor. La figura 6.10 refleja la gran importancia que tiene evaluar la pérdida de carga pues se puede ver cómo, cuando no se incluye (CASO 6), las perturbaciones son tan elevadas que la mala distribución del aire de entrada en el modelo A provoca que la fase densa arrastre en su descenso al gas un flujo inverso hacia el plénium cerca de las paredes de la columna.

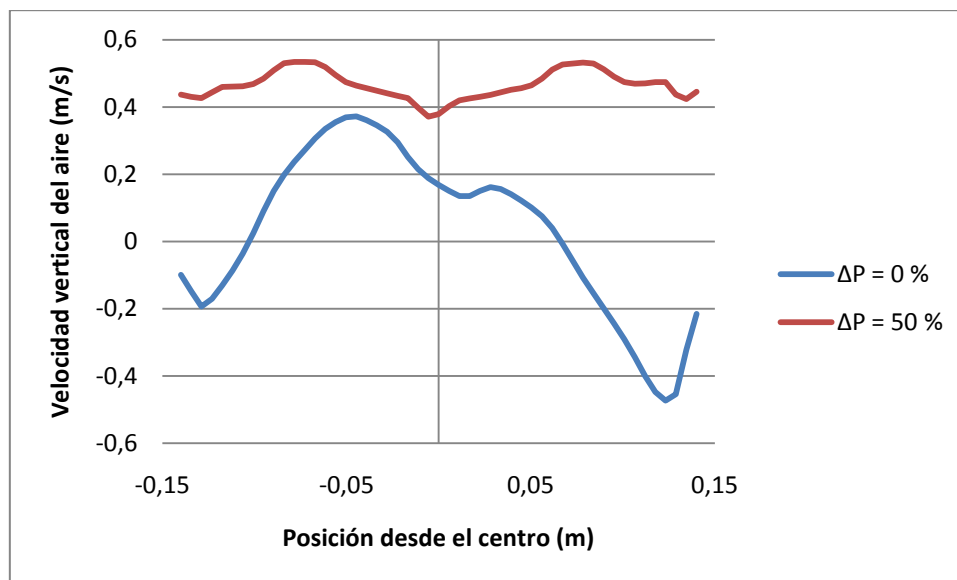


Figura 6.10: Velocidad vertical del aire sobre el distribuidor según la pérdida de carga; CASOS 6 y 8

6.2.3 Variación de la velocidad de fluidización

En este punto se aborda el estudio del comportamiento del lecho en función de la velocidad de fluidización para casos con la misma pérdida de carga en el distribuidor y el modelo de plénium B.

La figura 6.11 muestra las características de las burbujas y la altura que alcanza el lecho para los tres valores de velocidad de fluidización simulados en los casos 7, 8 y 9. Se puede ver que la altura así como el tamaño de las burbujas es mayor al aumentar el caudal de aire suministrado.

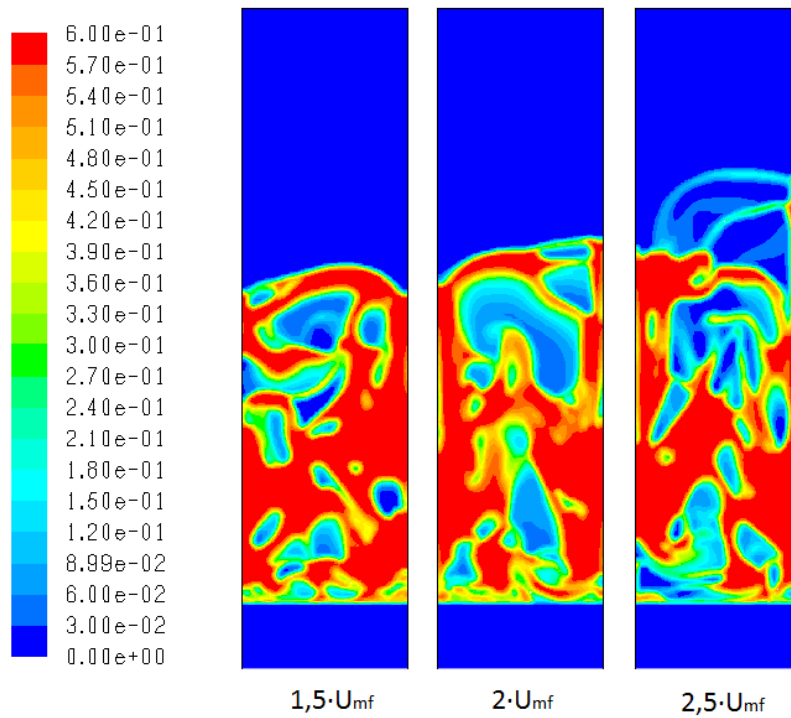


Figura 6.11: Fracción volumétrica de sólidos ($t=9s$); Casos 7,8 y 9

Un resultado inesperado es el obtenido al analizar la velocidad de las partículas sólidas pues, pese a barrer una rango de velocidades de entrada amplio no se aprecian grandes diferencias en el perfil de velocidades obtenido a lo largo de una línea de control situada a 20 cm del fondo del lecho (Fig. 6.12). Aun así se aprecia que la simulación del CASO 8 fue la menos uniforme, posiblemente debido a ciertos errores en la matriz de resolución de las ecuaciones de la temperatura granular que, a pesar de haberlos superado, pudieron dejar residuos sobre el comportamiento del lecho.

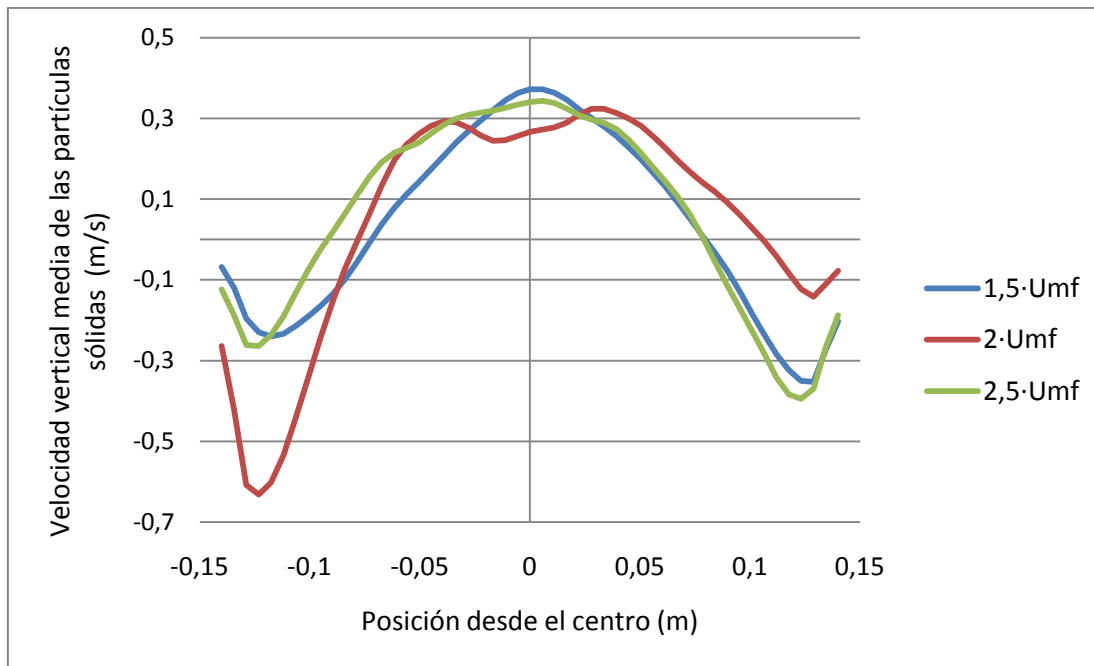


Figura 5.28: Velocidad vertical de las partículas sólidas para los casos de 1,5; 2 y 2,5 veces la velocidad de mínima fluidización ($z=20\text{cm}$)

Es conveniente realizar un análisis de la señal de presión sobre varios puntos situados a lo largo del dominio del lecho para comprender mejor la dinámica del lecho fluido. Sin embargo, el limitado tamaño de la muestra de los casos 8 y 9 hace imposible comparar los espectros de potencia de la señal de presión. Tan solo en el CASO 7 se obtuvieron suficientes datos para poder realizar el espectro (ver figura 5.31).

6.3 COMPARACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES

Gracias a un estudio experimental sobre los lechos fluidizados realizado por Sergio Sánchez Delgado se dispone de datos experimentales con los que comparar una simulación numérica. Por tanto, el objetivo de este apartado fue reproducir numéricamente los resultados obtenidos en el experimento. En primer lugar se comparan los resultados de la simulación con los datos experimentales disponibles y después se incluyen algunos resultados de interés que aportan información sobre el comportamiento del lecho fluidizado.

En primer lugar, está disponible el perfil de fracción volumétrica de sólidos medio (Fig. 6.12 (a)), así que se extrae de FLUENT el mismo perfil para la simulación (Fig. 6.12 (b)).

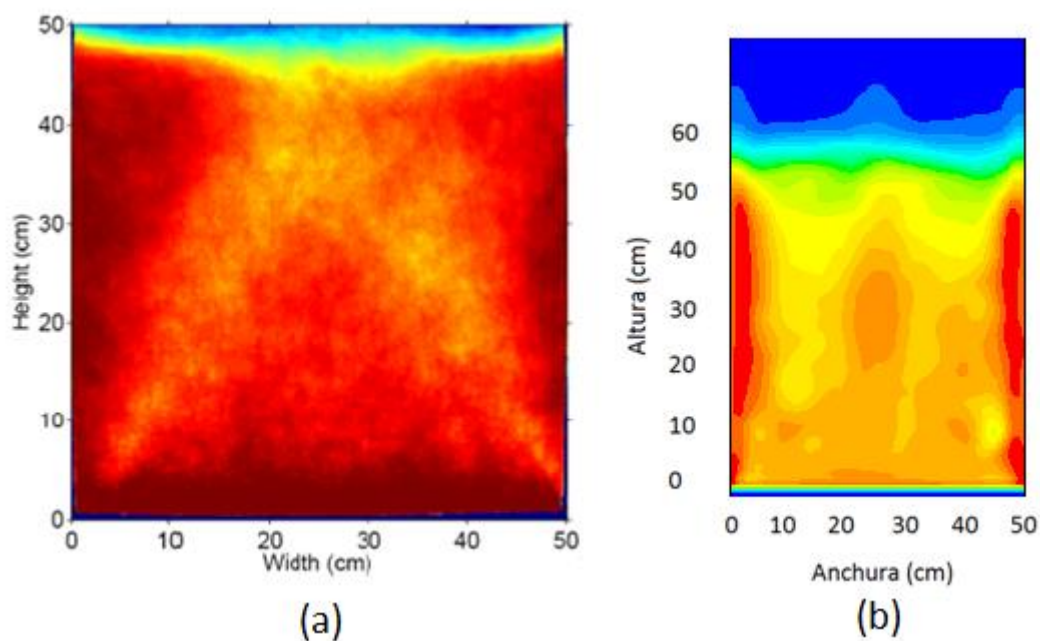


Figura 6.12: Fracción volumétrica de partículas sólidas para el caso experimental (a) y el caso simulado (b)

Se aprecia la similitud entre ambos perfiles por la mayor concentración de sólidos sobre las paredes de la columna y en la zona central del lecho, quedando dos caminos que van desde las esquinas inferiores del lecho hasta el centro de la superficie. Sin embargo, la altura que alcanza el lecho es del orden de 5cm superior en

el caso simulado (Fig. 6.12 (b)) que en el caso experimental (Fig. 6.12 (a)), lo que parece indicar que el estado de fluidización del caso simulado es más agitado e inestable.

También se conoce el perfil de velocidad de la fase densa del caso experimental (Fig. 6.13) por lo que es posible comparar los resultados de la simulación (Fig. 6.14). se compara con el modelo tipo 1 empleado en el experimento.

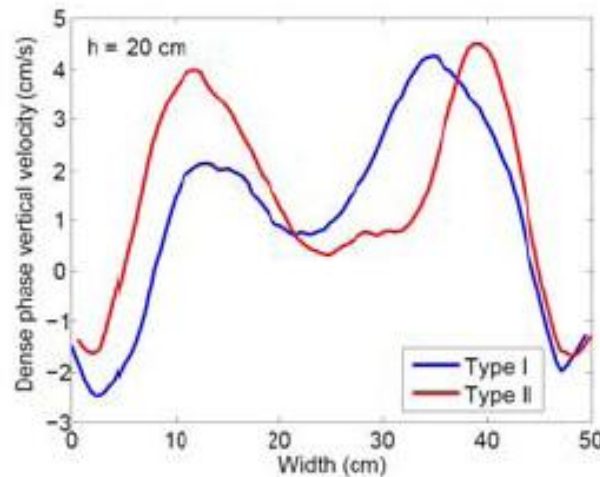


Figura 6.13: Velocidad vertical de las partículas sólidas en el caso experimental ($z=20\text{cm}$)

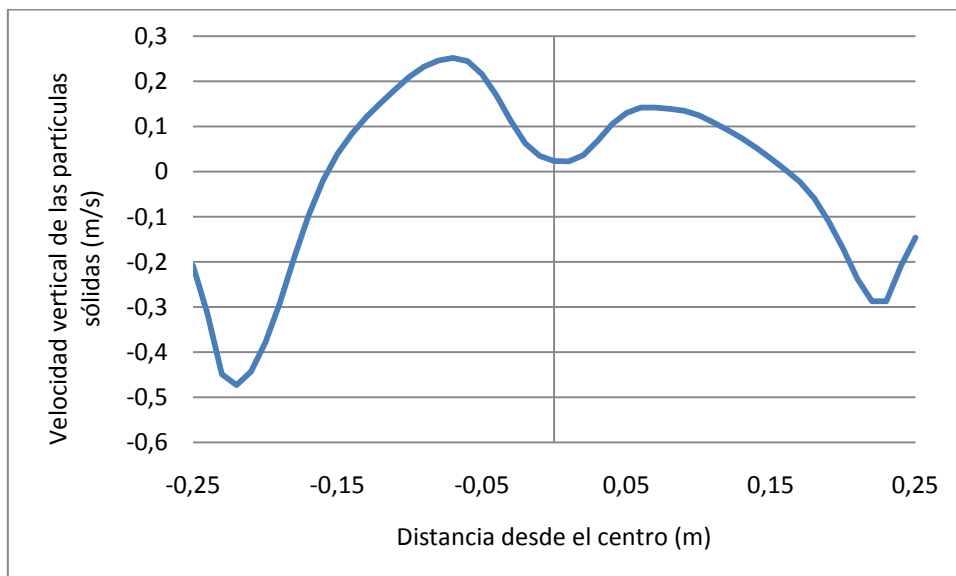


Figura 6.14: Velocidad vertical de las partículas en el caso simulado ($z=20\text{cm}$); CASO 10

Pese a que el perfil tiene una forma similar, la velocidad de las partículas en la simulación ha resultado ser mucho menor. Esto puede ser debido a que la tridimensionalidad del modelo experimental es imposible de reproducir en un modelo 2D el cual no considera la presencia de las paredes anterior y posterior y la fricción que éstas ejercen sobre el fluido.

Otra posibilidad de la que se dispone es la de comparar los espectros de potencia de las señales de presión. La figura 6.14 corresponde con los datos experimentales y la figura 6.15 con los obtenidos en la simulación.

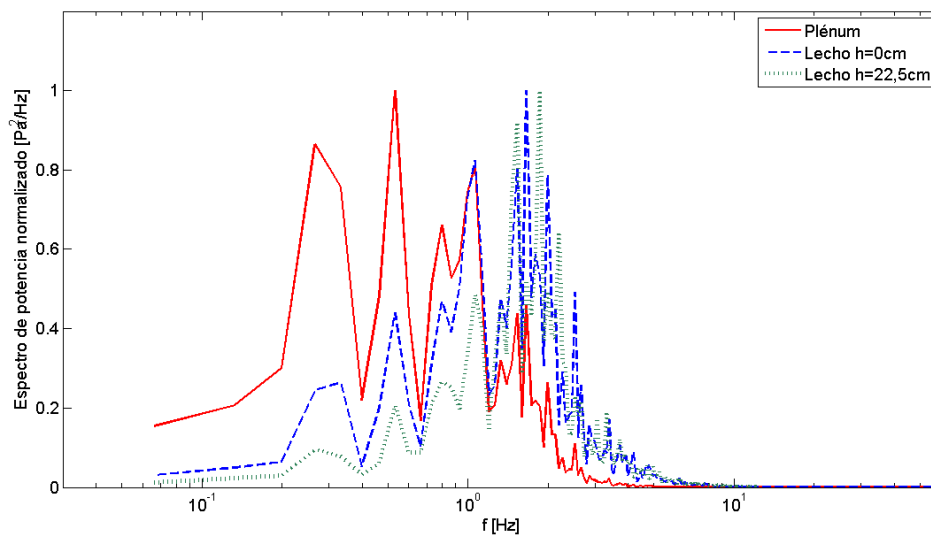


Figura 6.14: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Datos experimentales

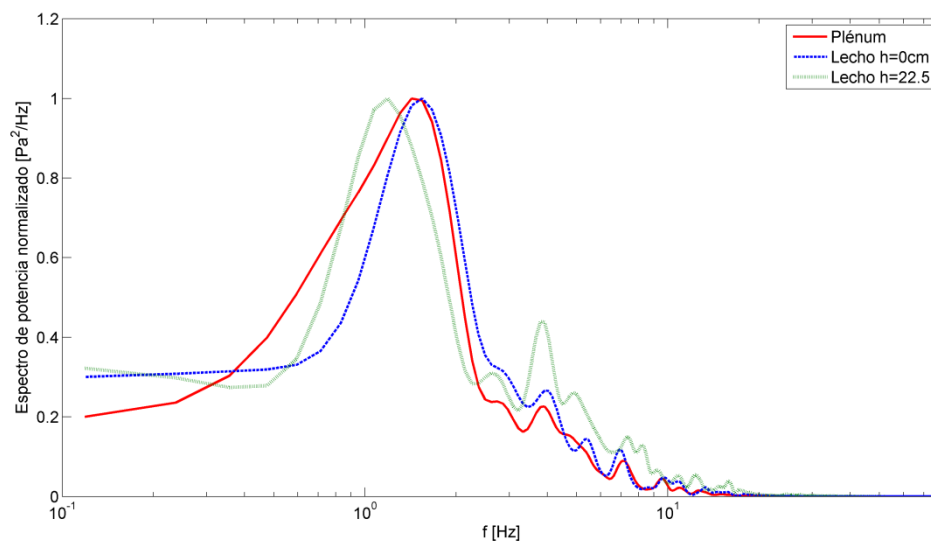


Figura 6.15: Espectro de potencia normalizado de la señal de presión; Caso 10

Si comparamos la señal de ambos espectros con la frecuencia fundamental teórica (ecuación 34) se puede ver como los resultados de ambos coinciden, siendo un poco más difusos los resultados procedentes del experimento por su propia naturaleza experimental acompañada de un rango pequeño de valores de los que extraer el espectro.

Se completa la información de la dinámica del lecho añadiendo más puntos de control sobre los que extraer la señal de presión (Fig. 6.16). Puede verse como la frecuencia fundamental se manifiesta de igual forma en todos los puntos del lecho, pero la intensidad es mayor conforme nos acercamos a la superficie libre del lecho dado que está más cerca de la zona donde se producen las perturbaciones principales de presión. La superficie es la zona donde las burbujas colapsan, produciendo las variaciones de altura del lecho causantes de las principales fluctuaciones de presión a lo largo del sistema.

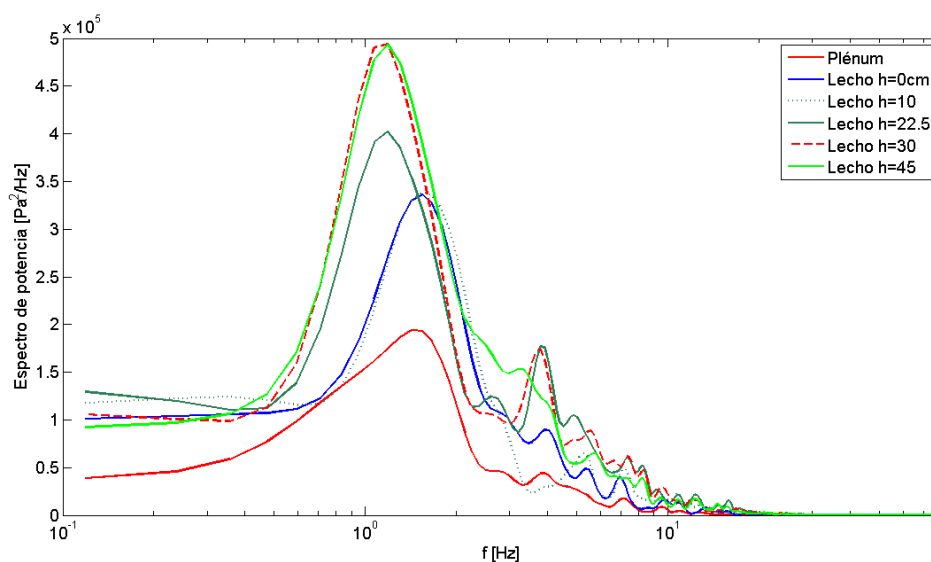


Figura 6.16: Espectro de potencia de la señal de presión; Caso 10

Como conclusión final, gracias a la comparación de todos estos resultados es posible afirmar que, pese a las dificultades que se ciernen en torno a las simulaciones CFD de tipo Euleriano-Euleriano de los lechos fluidizados, las técnicas numéricas aplicadas sobre entornos computacionales son capaces de lograr predecir la dinámica de este tipo de procesos de una manera eficiente. Es seguro que de contar con mayores recursos se lograría reproducir con más fidelidad la física de los lechos fluidos multifásicos pero, como se ha comprobado en este proyecto, al abordar de una forma sencilla las simulaciones CFD se puede conseguir una predicción aceptable sobre el comportamiento dinámico de los lechos fluidos.

6.4 ESTIMACION DEL COSTE DEL PROYECTO

La estimación del coste del proyecto se basa en el período de uso de los recursos informáticos, de las horas de ingeniería necesarias y de las horas de consultoría al director del proyecto. Se tiene en cuenta la amortización de los equipos, la adquisición de las licencias de software y la renovación de las mismas. Otros gastos tales como la luz, la limpieza de la oficina o el acceso a internet no se consideran para el cálculo del coste del proyecto.

El coste de realización de este proyecto se calcula de la siguiente manera:

Concepto	Cantidad	Periodo de uso	Coste unitario	Amortización anual (€)	Coste Total (€)
Alquiler de Sistemas Informáticos	2 unidades	6 meses	750€/año	187,5	375
Licencia académicas	3	6 meses	291€/año	-	437
Renovación de Licencias	3	-	150€/año		225
Horas de ingeniero	960	-	12,5€/hora	-	12.000
Consultas a Director de Proyecto	30 horas	-	200€/hora	-	6.000
				TOTAL	19.037€



6.5 CRÍTICA A LOS RESULTADOS

Durante la realización del proyecto se encontraron numerosos problemas con las simulaciones numéricas. Se sabía de ante mano la dificultad que conlleva este tipo de simulaciones y, pese a que la mayoría de los obstáculos fueron resueltos, el tiempo empleado en los ensayos de cada caso impidió extraer un rango de tiempo de iteración más amplio que lanzara resultados más precisos.

Las pruebas iniciales realizadas con modelos de malla refinados en las zonas más conflictivas resultaron ser inviables para alcanzar los resultados en un plazo de tiempo adecuado. Por tanto se tuvo que recurrir a mallas con celdas de mayor tamaño que restaban eficacia a las simulaciones. Posiblemente, de haber tenido mayores recursos informáticos se podría haber empleado los modelos de malla más finos, ajustando los resultados y proporcionando mayor precisión.

La programación de la caída de presión en el distribuidor ha supuesto un gran fiasco sobre las simulaciones. No se ha llegado a comprender a la perfección el manejo que hace FLUENT de las ecuaciones de porosidad, dando resultados que no eran los requeridos.

Por último resaltar la complejidad de simplificar la tridimensionalidad de los modelos reales para simular su comportamiento sobre dominios 2D. por ejemplo, al observar el perfil de velocidad de las partículas del CASO 10 se comprueba la discrepancia con el perfil experimental.

6.6 LÍNEAS FUTURAS DE ESTUDIO

Este proyecto tiene como principal objetivo contribuir al campo de estudio de los lechos fluidizados. Es por ello que se introducen los efectos de inclusión del plénum a los modelos de simulación. Dado que el proyecto parte desde cero y el tiempo establecido para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos es limitado queda un gran abanico de posibilidades para continuar la investigación sobre los lechos fluidos.

Es de gran interés conocer los efectos de la caída de presión existente al incorporar un distribuidor de aire al modelo, por lo que una línea de investigación futura debe ir encaminada a mejorar la caracterización del comportamiento del lecho ante caídas de presión en el distribuidor diferentes. Por tanto, barrer un rango de caídas de presión de entre el 10% y el 100% es un trabajo que debería hacerse para permitir optimizar aquellos procesos industriales en los que se emplee un distribuidor de aire con una pérdida de presión asociada a él.

Un estudio más avanzado sobre los distribuidores de aire debería incluir la simulación de los orificios verticales del distribuidor. Un método para conseguirlo podría ser mediante un refinamiento de la malla en el dominio del FLUENT, imponiendo las condiciones de contorno necesarias para impedir el paso de aire por las superficies que simularán las paredes de los orificios del distribuidor y permitiendo su paso por los orificios.

En este documento se presentan los resultados obtenidos en función de la velocidad de fluidización para un intervalo de 1,5 a 2,5 veces la velocidad de mínima fluidización. La falta de tiempo hace imposible simular casos correspondientes a un intervalo de velocidades más amplio por lo que sería importante simular los casos aquí expuestos para velocidades de fluidización diferentes.

Por otro lado, la caracterización de la dinámica del lecho mediante señales de presión es un método muy útil y efectivo. La falta de recursos ha impedido llevar más lejos los tiempos de iteración para las simulaciones. Es por ello que líneas futuras de estudio deben procurar alcanzar mayores tiempos de iteración para poder obtener resultados más exactos y caracterizar de una forma más precisa la dinámica del lecho mediante esta metodología.



7. BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Tutoriales de ayuda de FLUENT, 2002. Fluent 6.0 User's Guide, 20.4 Eulerian Model. Fluent Inc.
- ❖ D. Kunii y Octave Levenspiel, 1991, Fluidization Engineering, segunda edición, Butterworth-Heinemann, Boston.
- ❖ Dimitri Gidaspow, 1994, Multiphase Flow and Fluidization. Continuum and Kinetic Theory Descriptions, Department of Chemical Engineering Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois.
- ❖ Gidaspow, D., 1994. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions. Academic Press, San Diego.
- ❖ Grace, J.R., Taghipour, F., 2004. Verification and validation of CFD models and dynamic similarity for fluidized beds. Powder Technology 139, 99–110.
- ❖ Mariano Seoane Calvo, Ecología Industrial: Ingeniería Medioambiental Aplicada a la Industria y Empresa. Ed. Mundi-Prensa.
- ❖ James R. Welty, Charles E. Wicks, Robert E. Wilson, 1991, Fundamentos de Transferencia de Momento de Calor y Masa, segunda edición, editorial Limusa, México.
- ❖ J. A. Del Giorgio, 1997, Contaminación Atmosférica Métodos de Medida y Vigilancia, Alambra.
- ❖ Ding, J., Gidaspow, D., 1990. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow. A.I.Ch.E. Journal 36, 523–538.
- ❖ Huilin, L., Yurong, H., Gidaspow, D., 2003. Hydrodynamic modelling of binary mixture in a gas bubbling fluidized bed using the kinetic theory of granular flow. Chemical Engineering Science 58, 1197–1205.
- ❖ Syamlal, M., O'Brien, T.J., 1989. Computer simulation of bubbles in a fluidized bed. A.I.Ch.E. Symposium Series 85, 22–31.



- ❖ Syamlal, M., O'Brien, T.J., 2003. Fluid dynamic simulation of O_3 decomposition in a bubbling fluidized bed. A.I.Ch.E. Journal 49, 2793–2801



8. REFERENCIAS

1. F. Johnsson, R.C. Zijerveld, J.C. Schouten, C.M. van den Bleek, B. Leckner, characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *Int. J. Multiphase Flow* 26 Ž4. Ž2000. 663–715.
2. F. Johnsson et al. / *International Journal of Multiphase Flow* 26 (2000) 663±715
3. J. W. Hiby, Periodic phenomena connected with gas–solid fluidization, in: *Proc. Int. Symp. On Fluidization*, pp. 99–112. Eindhoven, Netherlands (1967).
4. R. C. Lirag, Jr. and H. Littman, Statistical study of the pressure fluctuations in a fluidized bed, *AIChE Symp. Ser.* **67** (116), 11–22 (1971).
5. L. T. Fan, T. C. Ho, S. Hiraoka and W. P. Walawender, Pressure fluctuations in a fluidized bed, *AIChE J.* **27**, 388–396 (1981).
6. H. Moritomi, S. Mori, K. Araki and A. Moriyama, Periodic pressure fluctuation in a gaseous fluidized bed, *Kagaku Kogaku Ronbunshu* **6**, 392– 396 (1980).
7. K. Tagashira, T. Shojima, Y. Seike, K. Shoguchi, Y. Nakahara, T. Furusawa, S. Mori, M. Horio and S. Morooka, *Japan Patent 60-127082* (1985).
8. H. Kage, N. Iwasaki, H. Yamaguchi and Y. Matsuno, Frequency analysis of pressure fluctuation in fluidized bed plénium, *J. Chem. Engng, Japan* **24**, 76–81 (1991).
9. H. Kage, N. Iwasaki and Y. Matsuno, Frequency analysis of pressure fluctuation in plénium as a diagnostic method for fluidized beds, *AIChE Symp. Ser.* **89** (296), 184– 190 (1993).
10. B. H. Nelson, C. L. Briens and M. A. Bergounou, Pressure fluctuations at individual grid holes of a gas–solid fluidized bed, *Powder Technol.* **77**, 95–102 (1993).
11. D. Wilkinson, Determination of minimum fluidization velocity by pressure fluctuation measurement, *Can. J. Chem. Eng.* **73**, 562–565 (1995).
12. M. Y. Wey and J. L. Shi, The effect of pressure fluctuations on PAHs emission and combustion efficiency during incineration, *Toxicol. Environment. Chem.* **61**, 83–98 (1997).
13. M. H. J. Baird and A. J. Klein, *Chem. Eng. Sci.*, 28 (1973) 1039.
14. V. A. Borodulya, Yu. A. Buevitch and V.V. Zav'yalov, *IFZh*, 31 (1976) 410.
15. J. F. Davidson and D. Harrison, *Khimiya* (1965) 184.
16. V. G. Kulbachnyi and K. E. Makhorin, *IFZh*, 6 (1971) 998.
17. J. S. M. Botterill, J. S. George and H. Besford, *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, 62 (1966) 7.
18. Chapman, S. and Cowling, T.G., (1970), *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases*, Cambridge University Press, 3d edition
19. Anderson, T.B. and Jackson, R., (1967). *Ind. EngngChem. Fundam.* 6,527



20. Pritchett, J.W., Blake, T.R. and Garg, S.K., (1978), AIChE Symposium Series, 74, 134
21. Jackson, R., (1985), in Fluidization (Davidson, J.F., Clift, R. and Harrison, D.), 47, Academic Press.
22. Jenkins, J.T. and Savage, S.B., (1983). J. Fluid Mech.130, 187
23. Lun, C.K.K., Savage, S.B., Jefferey, D.J. and Chepurniy, N., (1984), J. Fluid Mech., 140,223
24. Ding, J. and Gidaspow D., (1990), AIChE .I. 36,523
25. Sánchez-Delgado S., Almendros-Ibáñez J.A., Soria-Verdugo A., Santana D., Ruiz-Rivas U., in J. Werther, W. Nowak, K.E. Wirth, E.U. Hartge, (Eds.). TuTech Innovation GmbH, Hamburg, 2008, p. 1007.
26. A. P. Baskakov, V. G. Tuponogov and N. F. Filippovskiy (1985) A Study of Pressure Fluctuations in a Bubbling Fluidized Bed, Ural Polytechnic Institute, Sverdlovsk (U.S.S.R).
27. E. Peirano, V.Delloume, F. Johnsson and O. Simonin (2001), Numerical simulation of the fluid dynamics of freely bubbling fluidized bed: influence of the air supply system, Energy Conversion Department, Chalmers University of Technology, Sweden.